

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 生活與應用科學(三)科

083010

「咖」讚！「啡」典型環保水泥磚—水泥砂漿取
代配比強度之探討

學校名稱：臺中市私立明道普霖斯頓國民小學

作者： 小五 楊詠淇 小五 蔡惠如 小四 黃以晴 小四 張廷緯	指導老師： 陳昱勳 劉原旭
---	-------------------------

關鍵詞：水泥、碳化咖啡渣、減碳

「咖」讚！「啡」典型環保水泥磚－水泥砂漿取代配比強度之探討

摘要

水泥是生活中不可或缺的原料，卻是**碳排大戶**，約佔全球 7 %。另一大環境負擔是全球每年產出超過 1600 萬噸的咖啡渣。本次研究將利用**碳化咖啡渣**取代水泥砂漿中的砂石，並**降低水泥使用量**，找出黃金配比，**製作出環保且具有相當強度的水泥磚**，目的是能**降低製造水泥磚時所產生的碳排**。

從**強度**討論，設計【不同尺寸水泥磚的強度】、從原料中探討【碳化咖啡渣取代砂石比例】、【降低水泥使用量】，從**實際運用**上測試【水泥磚透水】、【水泥磚隔熱】、【摩擦力測試】。

實驗歸納，利用**碳化咖啡渣**取代 **20 %**的砂石能維持一定強度，且降低水泥 **19.8 %**的使用量仍有 **A 級水泥地磚標準**，**黃金配比**水泥磚，不但製作出高強度且輕量化的水泥磚**更可以降低 25 %的碳排放**。

壹、前言

一、研究動機

水泥是地球用量**第二大材料**，僅次於水，每年全球生產超過 40 億噸水泥，**佔全球總碳排放量 7 %**，相當於航空業的四倍；如果水泥是一個國家會榮登地球第三排碳國，咖啡目前世界平均每日要消耗掉 22.5 億杯咖啡，台灣人一年喝掉 28.5 億杯咖啡，每杯平均 20 公克，一年產生超過 1600 萬噸的咖啡渣，咖啡渣因為容易發霉不容易再利用，且用**掩埋處理會產生大量溫室氣體且會升溫導致碳排增加**，加劇全球暖化。目前咖啡渣的處理方法都是當作一般垃圾焚燒處理，看到澳洲墨爾本皇家理工大學竟然拿咖啡渣去和水泥混和製作出混凝土，讓我們想要了解其中的比例是如何，在**哪種比例下可以製作出環保減碳又堅固的水泥磚**。

二、文獻回饋

作品名稱	研究大綱	優點	缺點
全國 58 屆「酒矸英雄」	<ul style="list-style-type: none">● 利用回收高粱酒瓶取代水泥砂漿中的細砂● 探討成品強度、吸水性	<ul style="list-style-type: none">● 主題具有實用性與應用價值● 實驗紀錄完整，資料整理清楚	<ul style="list-style-type: none">● 沒有實際應用到生活中● 僅針對強度測試，無其他試驗● 酒瓶回收處理程序麻煩且危險

全國 61 屆 「蛋殼翻身之路 ~建築具蛋」	<ul style="list-style-type: none"> ● 蛋殼替代水泥比例之強度探討 ● 蛋殼水泥隔熱測試 ● 蛋殼水泥隔音測試 	<ul style="list-style-type: none"> ● 紀錄詳實 ● 增加蛋殼更多用途 	<ul style="list-style-type: none"> ● 樣本數太少，可能有誤差 ● 水泥和水泥砂不同，相互比較有失公允 ● 強度測量誤差大
全國 61 屆 「金」「壁」「灰」 煌-會呼吸的智慧 多孔創新材料 初探	<ul style="list-style-type: none"> ● 利用金紙灰取代水泥砂漿中砂的比例 ● 利用金紙灰取代水泥砂將中水泥的比例 	<ul style="list-style-type: none"> ● 紀錄詳實，具有實用性 ● 考慮到在地廢棄物處理問題 	<ul style="list-style-type: none"> ● 植化實驗樣本太少 ● 金紙灰材料的材料統一性 ● 取代後抗壓強度不夠
我們的作品： 「咖」讚！「啡」 典型環保水泥磚 —水泥砂漿取代 配比強度之探討	<ul style="list-style-type: none"> ● 不同尺寸水泥磚之強度探討 ● 碳化咖啡渣取代水泥砂漿中的砂石之強度探討 ● 降低水泥使用量之強度探討 ● 自製水泥磚透水實驗 ● 自製水泥磚隔熱實驗 ● 實際使用自製水泥磚並分析使用效果 	<ul style="list-style-type: none"> ● 本次研究特色 <ul style="list-style-type: none"> ■ 使用市售常見尺寸，按比例縮小尺寸測試，模擬真實情況 ■ 讓廢棄咖啡渣多一用途，創造另一價值 ■ 真實數據討論不同砂石取代率之強度 ■ 真實數據討論降低水泥使用量之強度 ■ 維持 A 級強度，抗壓強度 $\geq 650 \text{ kgf/cm}^2$ ■ 比原本水泥磚輕量化 12.5 %，降低負重 ■ 實際運用到校園場域，效果相當理想 ■ 經過計算，按照黃金配比可以降低製作水泥磚 25 %排碳量 <p>我們的【「咖」讚！「啡」典型環保水泥磚】不但輕量化且降低碳排 25 %，同時維持高抗壓強度達到節能減碳目的</p>	

貳、研究目的

研究一：搜尋水泥磚相關資料，找出水泥種類、原料資訊、測試的方法有哪些

研究二：原料選擇和碳化咖啡渣之處理

研究三：製作標準混凝土水泥磚及探討不同尺寸混凝土水泥磚強度之不同

研究四：取代砂石使用量之強度探討

研究五：降低水泥使用量之強度探討

研究六：不同比例水泥磚透水探討

研究七：不同比例水泥磚隔熱之探討

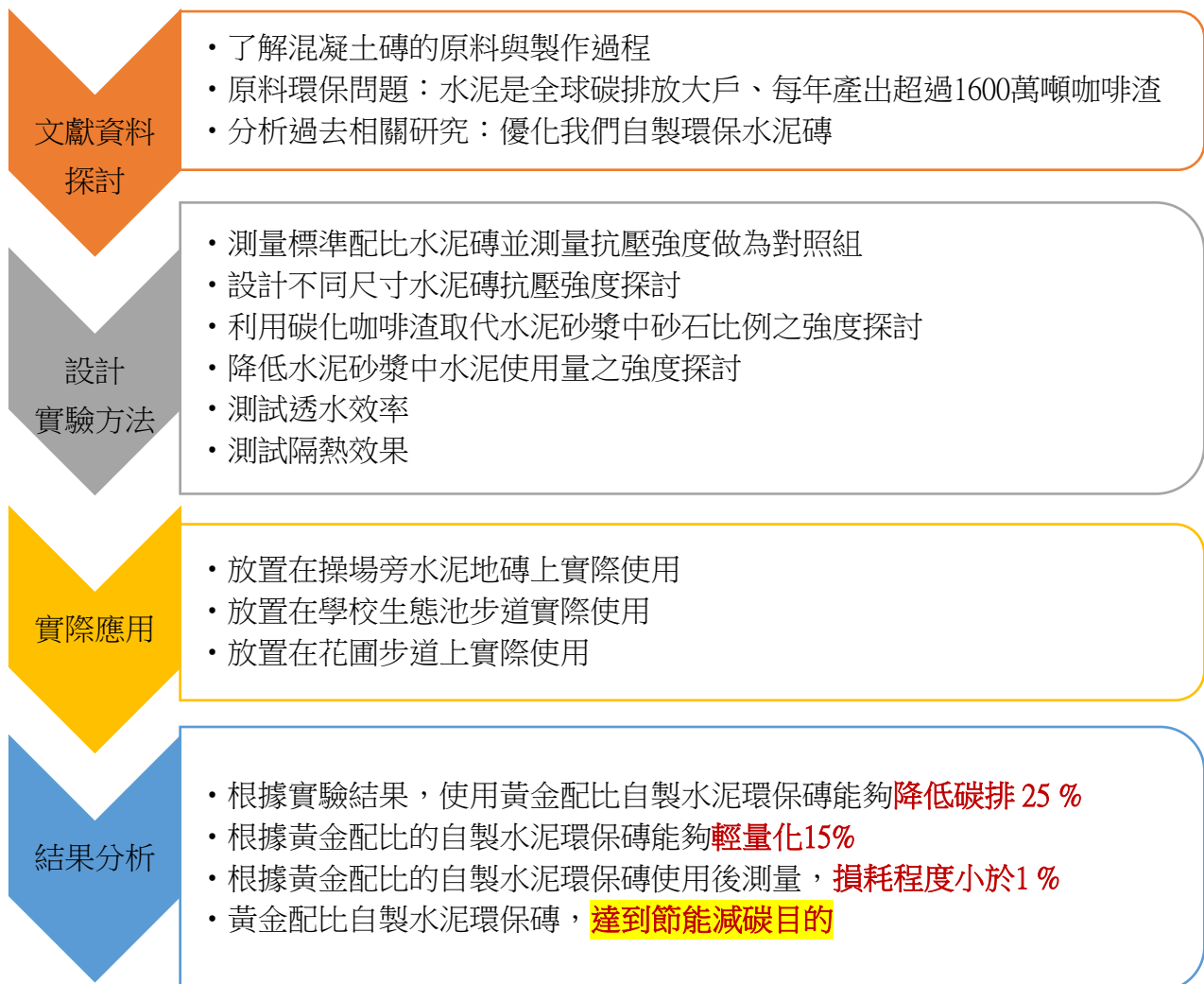
研究八：水泥磚摩擦力測試

研究九：製作最佳比例水泥磚及實際應用

參、研究設備與器材

製作工具	測量工具	製作原料
1. 電動攪拌器 2. 雷切木板水泥模 3. 雷切壓力克水泥模 4. 塑膠水盆 5. 高溫乾餾爐	1. 捲尺 2. 電子秤 3. 壓力機 4. 碼表 5. 紅外線溫度計 6. 500w 鹵素燈	1. 卜特蘭水泥 1 號水泥 2. 自來水 3. 咖啡渣 4. 砂石 5. 凡士林

肆、研究過程與方法



一、搜尋水泥磚相關資料，找出水泥種類、原料資訊、測試的方法有哪些

(一)、市面上常見的水泥種類

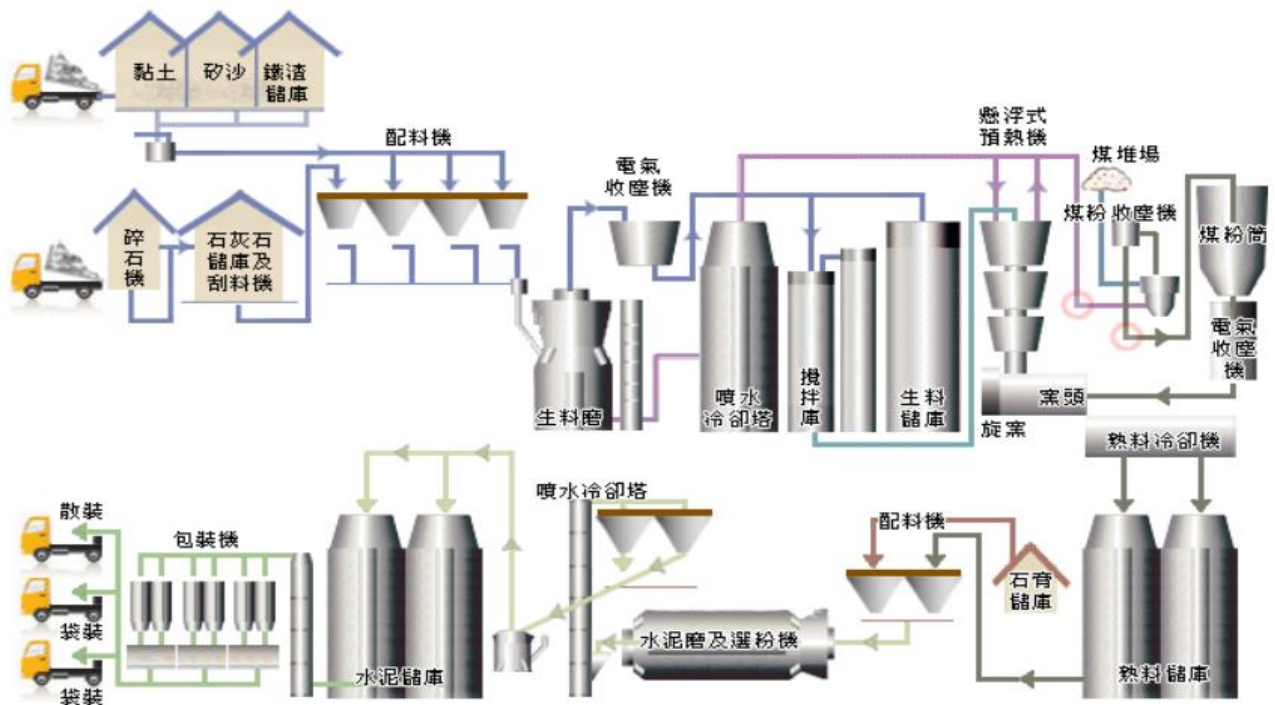
水泥種類	使用範圍	特性	常用用途
★卜特蘭 1 型	不特別暴露在含硫酸鹽土壤或地下水結構工程使用。	不具其他種水泥特性，一般建築工程使用， 占水泥使用量約九成以上。	鐵路、電力、橋樑、一般建築等。
卜特蘭 2 型	抵抗中等硫酸鹽侵蝕的地方，避免龜裂。	較第一型水泥有較低的水合熱，具鹼含量低及中度抗硫酸鹽特性。	大橋墩、重力式擋土牆。
卜特蘭 3 型	短期內需要拆模者適用。	特別需要高度早期強度者，一周內或者是更短。	道路搶救、軍事工程、水中工程。
卜特蘭 4 型	水合熱發展速率恆保持 在一最低限度內，其強度的發展速率較I型水泥慢。	硬化時水合熱為第一型的 70%	水壩工程、巨大體積工程適用。
卜特蘭 5 型	混凝土暴露於 嚴重硫酸鹽侵蝕作用的地區。	具有抵抗高度硫酸鹽 浸蝕之特性。	抗酸蝕、下水道、地下室、 溫泉區等特殊環境之工程。
卜特蘭高爐水泥	可取代傳統一般混凝土所使用 1 型水泥。	具較低水合熱、較高晚期抗壓強度、耐久性及低成本等	大壩工程、海邊工程、隧道工程及下水道工程
墁砌水泥	適用於墁砌	使用方便、節省成本、無需再加其他添加物、節省工時、施工省力、可施作時間長、不易乾縮龜裂、保水性佳、浮水量少。	土水師傅專用於泥作施工之水泥。
水硬性水泥 IP 型		低水合熱、高度抗硫酸鹽性能。	海事工程及產製巨積混凝土建築物。

水泥地種類有相當的多種，但是在綜合比較上，此次科展主題製作的是水泥磚，因此根據特性以及成本的關係，**這次研究選用卜特蘭 1 型水泥**當作這次研究的水泥材料。

卜特蘭 1 型水泥的成分為：由矽酸鹽水泥熟料、0 %-5 %石灰石或粒化高爐爐渣、適量石膏磨細製成的水硬性膠凝材料。

波特蘭水泥熟料的主要成分為矽酸三鈣 ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)、矽酸二鈣 ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)、鋁酸三鈣 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) 和鐵鋁酸四鈣 ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)。

(二)、水泥製作流程(圖片摘錄於東南水泥股份有限公司網站)



(三)、水泥碳排放

根據經濟部產業節能減碳資訊網站資料，水泥產業因為製程特性，以旋窯高溫鍛燒生產水泥熟料過程石灰石分解，以及燃料與電力等能源耗用，**是碳排放量相對高的產業，約佔全球碳排 7 %**，水泥的生產流程包含開採石灰石、研磨生料、燒製熟料與研磨水泥，**平均每生產一噸水泥會排放 0.8 到 0.9 噸的二氧化碳**，其中，約 60 %來自於石灰石原料鍛燒的製程排放、35 %是煤炭燃燒的排碳，以及 5 %的用電碳排。

(四)、砂石碳排放

根據 SimaPro 生命週期評估軟體以及國立成功大學碳排研究數據得知，砂石碳排如下：

	類別	成功大學研究數據 (kgCO_2/kg)	SimaPro 數據 (kgCO_2/kg)
石質	砂礫	0.03	0.00239
	採石	0.04	0.23
	合計	0.07	0.23239

(五)、咖啡豆碳排放

根據產品碳足跡資訊網中資料，咖啡雖然是植物性食物，**每公斤產生的碳排放約 17 kg**，碳排放在植物中算是高碳排的植物。

(六)、水泥養護

根據公共工程委員會施工綱要規範第 03390 章混凝土養護以及 CNS 國家標準局的養護法來養護此次實驗用的水泥磚。

(七)、混凝土強度測試

1. 抗壓測試

(1) 圓柱抗壓式體模測試

(2) 立方體抗壓式體模測試 (此次實驗用此方法)

2. 抗彎測試

根據 ASTM 抗彎測試法，將試體兩邊架高，中間壓力測試，取得抗彎壓力值。(此次實驗用此方法)

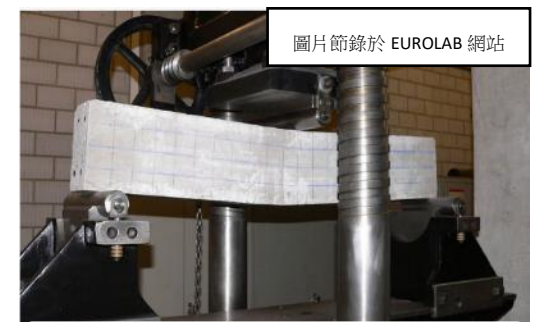
3. 衝錘試驗法

此法係由瑞士工程師 Schmidt 於 1948 年所研發出來的，為目前較常用於測定混凝土強度的表面硬度法，且此法已被列入 CNS 國家標準中。如下圖所示，反彈錘的構造主要有四部份：

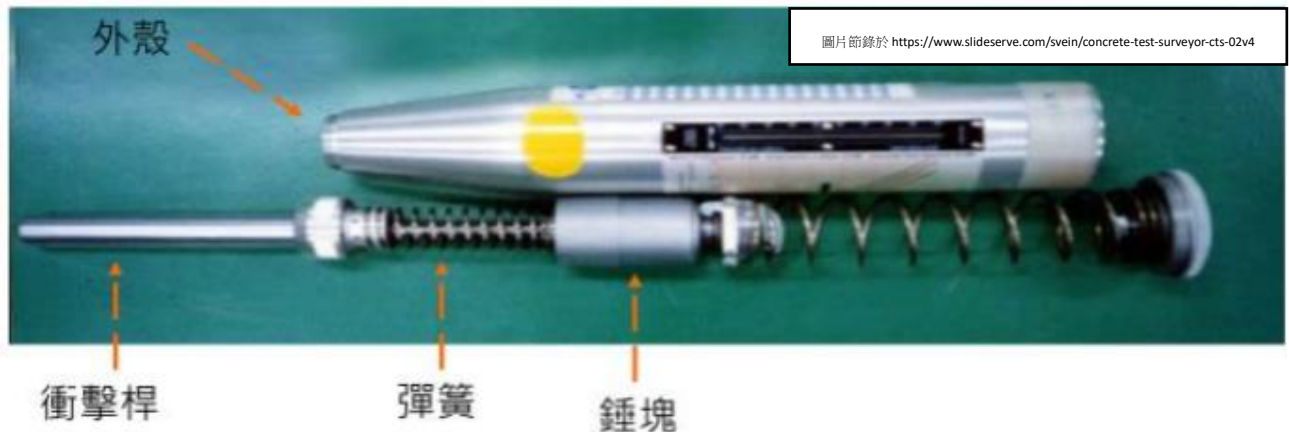
(1) 外殼 (2) 衝擊桿 (3) 錘塊 (4) 彈簧，混凝土檢測—反彈錘 外殼 彈簧 衝擊桿 錘塊 混凝土的表面硬度測量，並用此測量來推測其混凝土抗壓強度。是一種以表層混凝土(1~3 mm)的質量推斷整體質量的表面硬度法。



壓力測試器



ASTM 抗彎測試



二、原料選擇和碳化咖啡渣之處理

(一)、根據澳洲莫爾本皇家理工學院的研究指出，咖啡渣可以取代混凝土中的砂石，一樣可以達到混凝土提供的強度，首先我們從處理咖啡渣開始。

(二)、咖啡渣的處理與收集

1. 咖啡渣處理方式：

咖啡渣屬於生物類廢料，目前被當作垃圾處理，目前主要的處理方式是掩埋，但是大量掩埋咖啡渣時，會產生大量甲烷，影響空氣的品質，若可以加以利用咖啡渣來製作其他物品，可以達到更環保且有效的利用。此次主題利用咖啡渣來當作取代砂

石的材料，不但可以減少砂石使用還可以再次廢物利用，達到環保再利用的功能。
將咖啡渣發揮最大價值！

- 咖啡渣的收集：
學校附近的咖啡店、便利商店，收集咖啡渣。

(三)、碳化咖啡渣的處理

咖啡渣碳化的過程利用了**乾餾法將咖啡渣中裡面的雜質去除**，將咖啡渣變成生物碳。

1. 碳化咖啡渣處理-步驟 1

首先先製作乾餾的器具，起初我們利用不銹鋼鐵盒和卡式爐製作乾餾的器具，將收集的咖啡渣先利用太陽曬乾，再將咖啡渣放入鐵盒密閉，利用卡式爐直火加熱咖啡渣到沒有冒煙，當白色煙霧停止時，此時判斷乾餾的過程已完成。



- 乾餾反應剛開始產生的白煙大部分為小水滴，加熱到一定溫度之後，當盒內的咖啡渣溫度提升且裡面水分完全被汽化之後開始加熱，之後冒出的白色煙霧為乾餾後的產物，此次實驗目的就是要去除咖啡渣中的雜質。當白煙停止時，判定為反應完成。

(2) 乾餾數據如下：

乾餾溫度	乾餾前重量	乾餾後重量	乾餾時間	瓦斯
約 460 °C	672 g	232 g	47 分鐘	233 g



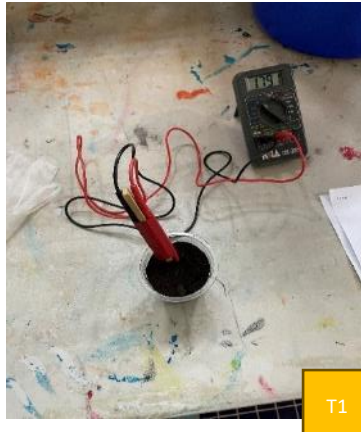
乾餾後重量剩原本重量約 35 % 左右，體積為原本的 30 %，鐵盒溫度最高溫可以高達 400 °C 左右，但是每次需要用的碳化咖啡渣用量太大，這樣子的處理速度太慢，因此我們改良了第二代的乾餾器具，將不鏽鋼鍋加大，如此一來才能一起處理較多的咖啡渣，不但增加處理效率也同時節約碳化的能源。

2. 碳化咖啡渣處理-步驟 2(加大乾餾的器具)

上一代處理的最大重量約 672 g，處理後約得到 232 g 左右的碳化咖啡渣，將鍋子的大小增加到一次可以處理 1524 g

			
重量加到 1524 g	利用鋁箔隔絕空氣	隔絕空氣加熱	溫度約 388 °C

※沒有冒煙之後打開發現狀況如下：

		
鋁箔上出現褐色產物	乾餾物不完全	導電度測試乾餾程度

打開鍋蓋的時後發現，鋁箔上的褐色產物黏稠，判斷為焦油且有臭味，和查到的乾餾結果不相似，產物還留在原本的上而且打開蓋子發現咖啡渣乾餾的程度不完全，經過導電度的測試之後發現，重量加大之後用一樣的火源加熱，溫度不夠高且乾餾效果不好，我們對鍋子經過一些改造，將鍋子加入煙囪可以讓雜質順利排出，但是發現溫度還是沒辦法提升，導致很多雜質無法排出，且從冒煙開始到不冒煙需要更長的時間，約 2.5 小時且需要用到 699 g 的瓦斯，反而增量變得更不環保且效果也不佳。

3. 碳化咖啡渣處理-步驟 3(參考全國科展 63 屆-這「炭」有「種」- 自製無煙速燃炭粉餅結合火種功能的可行性)

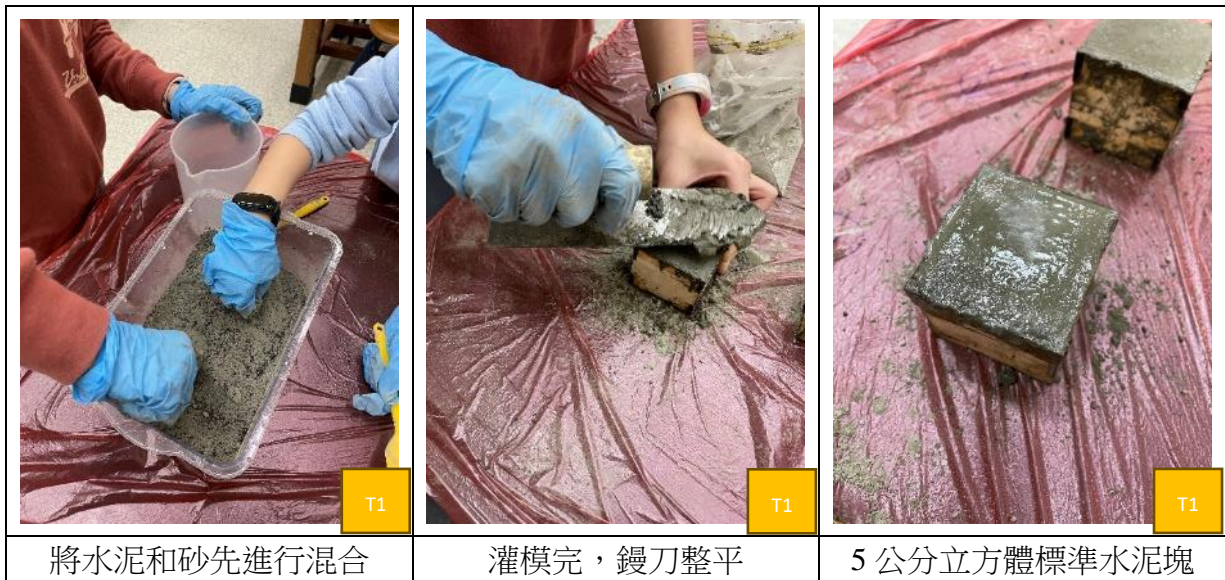
			
冒煙排出雜質	溫度高自己燃燒	溫度 638 °C	溫度 744°C

參考全國科展 63 屆-這「炭」有「種」- 自製無煙速燃炭粉餅結合火種功能的可行性，製作的水泥爐，因為快速燃燒且水泥的保溫特性，可以讓水泥桶內升溫**高達 744 °C**，且在約**45 分鐘內可以處理 1524 g 的咖啡渣**，並使用了 233 g 的瓦斯，利用這方法不但效果好且更為環保，一樣的瓦斯可以處理更多的咖啡渣。

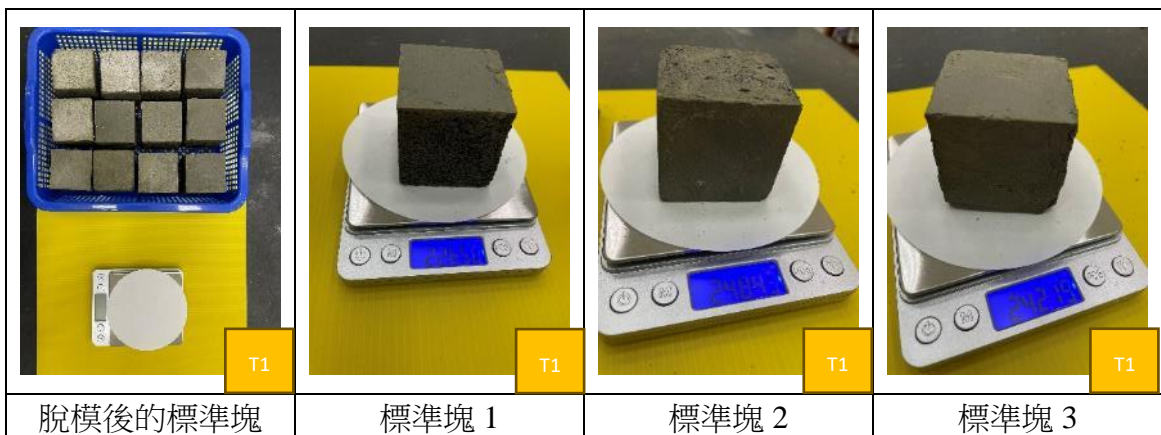
三、製作標準混凝土水泥磚及探討不同尺寸混凝土水泥磚強度之不同

(一)、【標準試體製作】

1. 根據 CNS 國家標準測量的試體為，圓柱體有 12 cm × 24 cm 及 15 cm × 30 cm 兩種，或是立方體 5 cm × 5 cm × 5 cm 的立方體測試，這次研究用立方體來製作標準試體。
 - (1) 水泥砂漿標準配比為 水：砂：水泥 = 0.485：2.75：1
 - (2) 利用雷射切割切出 5 cm 標準立方體灌漿模
 - (3) 混合後快速將水泥砂漿灌入模型
 - (4) 靜待 24 小時將模拆開，讓水泥塊進行熟成養護
 - (5) 熟成養護初期 7 天，完成養護 28 天
 - (6) 進行抗壓測試標準水泥塊



2. 成品如下：



乾燥後的水泥塊重量如下表：平均重量：238.38g 密度：1.90 g/cm³

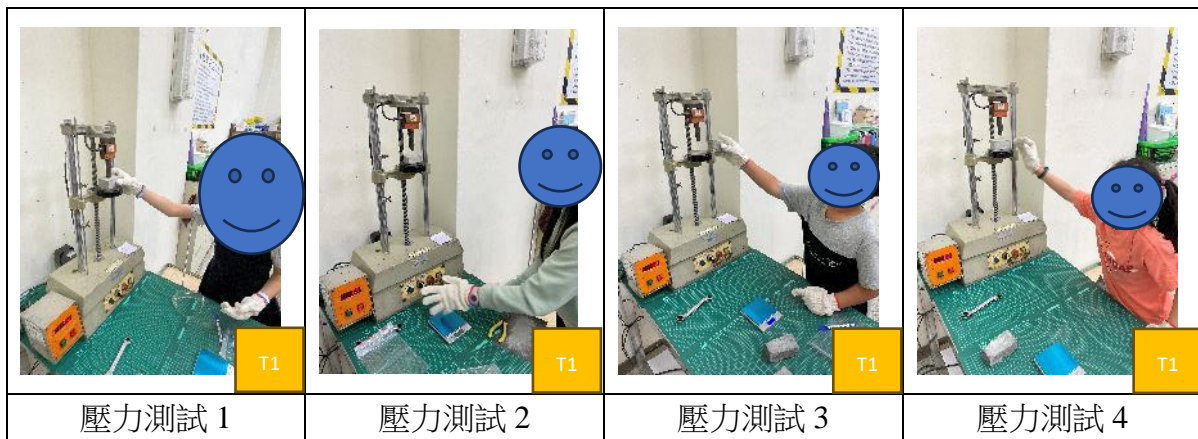
以下針對水泥塊做一些基本的測量與資料的紀錄，水泥的重量測量方法為，每天測量，當測量後的重量不再改變，就將該值紀錄為水泥標準塊重量，水泥重量如下表所表示：

標準塊淨重						
標準塊	編號 1	編號 2	編號 3	編號 4	編號 5	編號 6
重量(g)	226.56	248.43	242.15	237.58	244.45	243.21
標準塊	編號 7	編號 8	編號 9	編號 10	編號 11	編號 12
重量(g)	223.87	233.57	248.53	245.32	223.77	243.19

根據測量結果，水泥標準塊 平均重量：238.38 g 密度：1.90 g/cm³。

(二)、【標準試體測試】

- 將標準試體放入壓力測試機平台上測試
 - (1)先將標準試體放入平台正中間
 - (2)旋轉速度採用 80 (每分鐘轉 80 圈)旋轉向上
 - (3)鑽頭面積為 $0.2 \times 1.6 = 0.32$ 平方公分
 - (4)標準塊 1~6 為 7 天養護期測試
 - (5)標準塊 7~12 為 28 天養護期測試



標準養護 7 天後抗壓測試							
標準塊	編號 1	編號 2	編號 3	編號 4	編號 5	編號 6	平均
壓力	665.0	659.2	661.8	664.0	664.0	663.5	662.9
標準養護 28 天後抗壓測試							
標準塊	編號 7	編號 8	編號 9	編號 10	編號 11	編號 12	平均
壓力	782.3	775.5	778.6	781.2	781.2	780.6	779.9

標準試體 7 天養護抗壓測試後得平均壓力為 662.9 kgf / cm²，標準試體 28 天後養護抗壓測試後得平均壓力為 779.9 kgf / cm²，兩者抗壓相差 117 kgf/cm²，相差約 15%，代表 7 天養護後的抗壓已經達到一定程度，但 28 天後強度更佳。接下來所製作的水泥塊都會採取秤重後重量不再變化且已經超過 28 天養護期之後測試水泥塊，確保水泥塊達到最強的硬度。

(三)、【不同尺寸試體製作】

1. 根據標準試體測量結果發現，在測量壓力時，因為標準試體相當的穩固在破壞的過程中會碎裂導致水泥碎屑噴出，有一定的危險性，因此想要了解不同尺寸之下，抗壓的程度是否會有相當的關聯呢？

(1) 市售常見的水泥磚尺寸為 長×寬×高= 20 × 10 × 6 立方公分。

(2) 將長、寬、高成等比例縮小製作水泥磚。

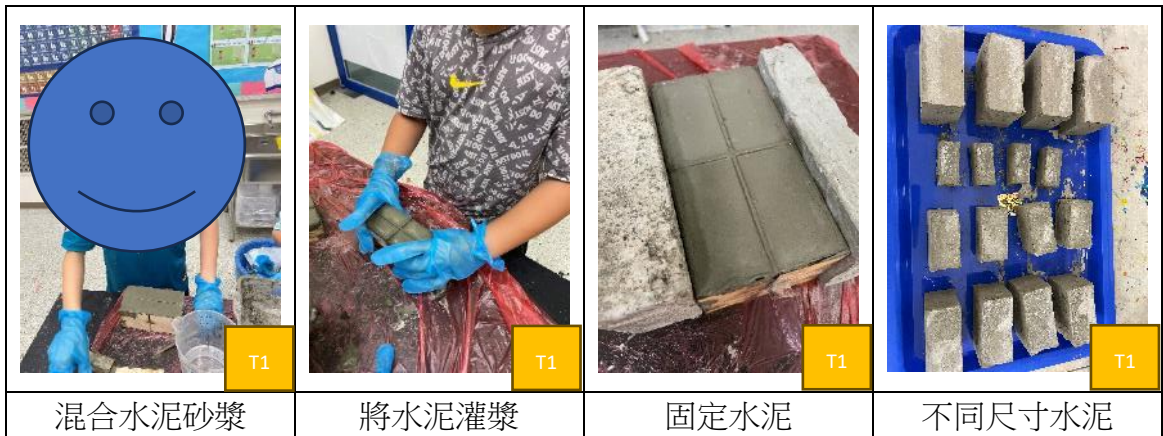
尺寸	長 cm	寬 cm	高 cm
市售尺寸	20	10	6
70 %	14	7	4.2
60 %	12	6	3.6
50 %	10	5	3
40 %	8	4	2.4
30 %	6	3	1.8

2. 製作不同尺寸的水泥磚

(1) 準備等比例縮小的雷射切割模型

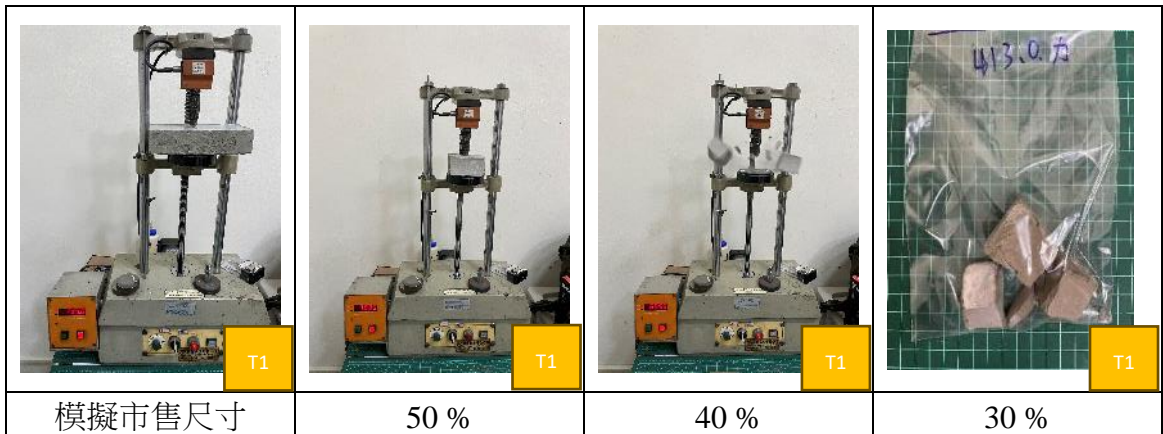
(2) 使用標準配比的水泥砂漿，混合後灌入模型

(3) 靜待 24 小時後取出養護 28 天



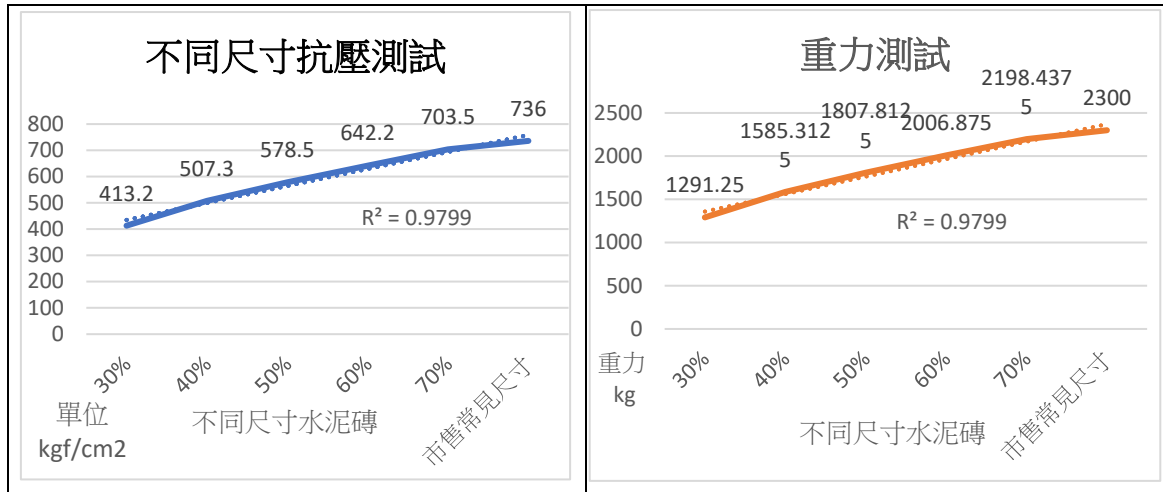
3. 不同水泥磚的抗壓強度測試

(1) 水泥磚抗壓測試



(2)抗壓測試結果如下表：

尺寸	常見市售	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %
壓力 (kgf/cm ²)	736.0	703.5	642.2	578.5	507.3	413.2
重力(kgf)	2300.0	2198.4	2006.9	1807.8	1585.3	1291.3



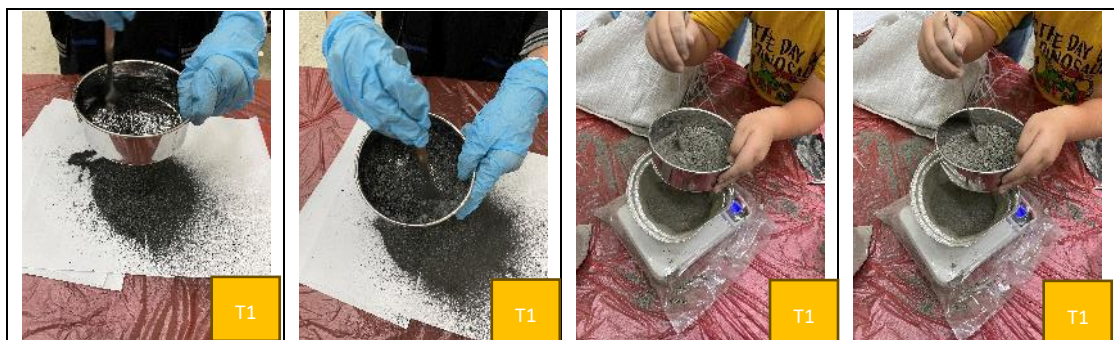
根據重力測試後換算抗壓程度，發現尺寸的縮小和抗壓的程度有一定的關係，從此實驗可以得知尺寸越小抗壓程度越低，測試之後的回歸線 **R² 值都大於 0.97**，代表有一定的關聯，往後的測試將會採用市售常見尺寸 **50 %** 的比例製作水泥磚測試。

四、碳化咖啡渣取代砂石使用量之探討


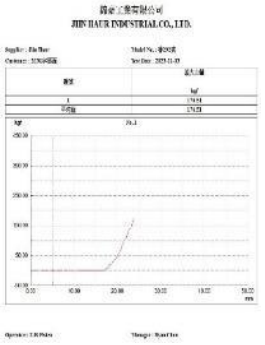

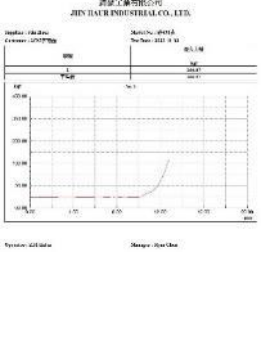
(一)、【取代是否比較強?】是!

1. 一般的水泥砂漿利用水泥、砂石、和水去混合，經過材料相互作用之後讓水泥和水結合變成堅硬的水泥，如果可以減少其中砂石的使用，可以減少很多的碳排放，因此這次科展想要了解，砂石和碳化咖啡渣中取代的比例究竟可以高達多少？

- (1) 首先利用標準配比的水泥砂漿，將其中的砂石重量利用碳化咖啡渣取代重量的 20 % 進行水泥砂漿混合灌模
- (2) 過程中發現砂石和碳化後的咖啡渣顆粒大小不同，為了確保實驗準確性，先將砂石和碳化後的咖啡渣進行過篩，確保實驗所使用的都是在一定篩選後的砂石以及碳化咖啡渣







(3) 脫模後，進行標準養護 28 天接著進行抗壓測試

			
咖啡渣壓力測試	最大值 176.51 kgf	標準砂漿壓力測試	最大值 166.87 kgf

壓力測試後初步得到結果是利用**碳化咖啡渣的水泥塊最大抗壓力為 176.51 kgf** 就會破裂，**標準砂漿最大抗壓力為 166.87 kgf**，兩者相差約**5.4%**左右，換句話說，**取代其中的砂石 20% 的重量不但可以節省砂石抗壓力還增加**。
★★★但想到一個疑問，一定要是碳化的咖啡渣才有效嗎？

(二)、【咖啡渣一定要碳化嗎?】必須碳化!

- 上面實驗發現利用碳化咖啡渣可以取代部份的砂石，其實處理碳化咖啡渣的過程需要耗費大量的時間，設想如果**咖啡渣直接拿來利用**，是否會有一樣的效果呢？如果有一樣的效果那就可以大大降低的處理所耗費的時間與能源。
 - 利用標準水泥砂漿配比，將其中的的砂石利用**咖啡渣直接混合後攪拌均勻**
 - 脫模後進行養護 28 天後抗壓力測試

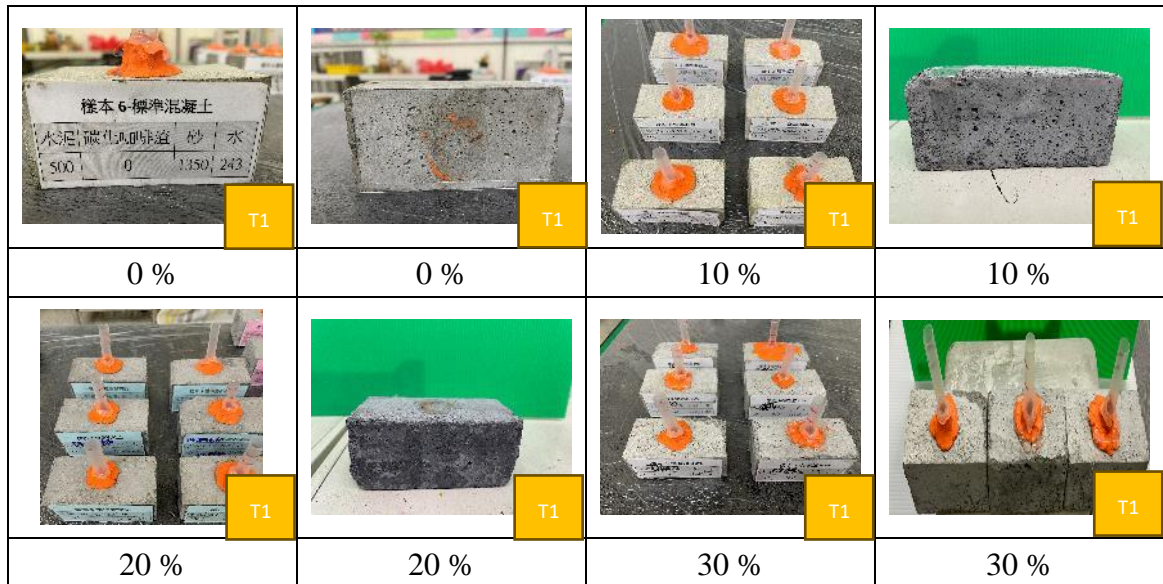
			
混合水泥砂漿	脫模養護七天後	放入抗壓平台	抗壓強度 11.5 kg

在混合後的過程觀察，咖啡渣直接使用會有幾個問題產生，(1)咖啡的味道相當濃厚(2)不容易脫模 (3)在移動的過程中水泥磚就產生裂縫，經過抗壓機的壓力測試後竟然 **11.5 kg/cm² 就產生破壞性的裂縫，抗壓力只有取代 20 % 的 2 %**，因此使用**碳化咖啡渣是必要的**。

(三)、【不同取代比例】

- 在這次研究初步將砂石利用碳化後的咖啡渣取代，首先先測試 20 % 砂石和碳化咖啡渣的重量取代，實驗結果相當的好，發現利用碳化咖啡渣的抗壓能力完全不遜色於原本的標準配比製作的水泥砂漿做的水泥塊。**接著這項研究會將水泥砂漿中的砂石取代比例從重量的 10 %、20 %、30 % 進行混合測試結果。**
- 下表為每次製作六塊尺寸 50 % 的水泥磚所需材料。

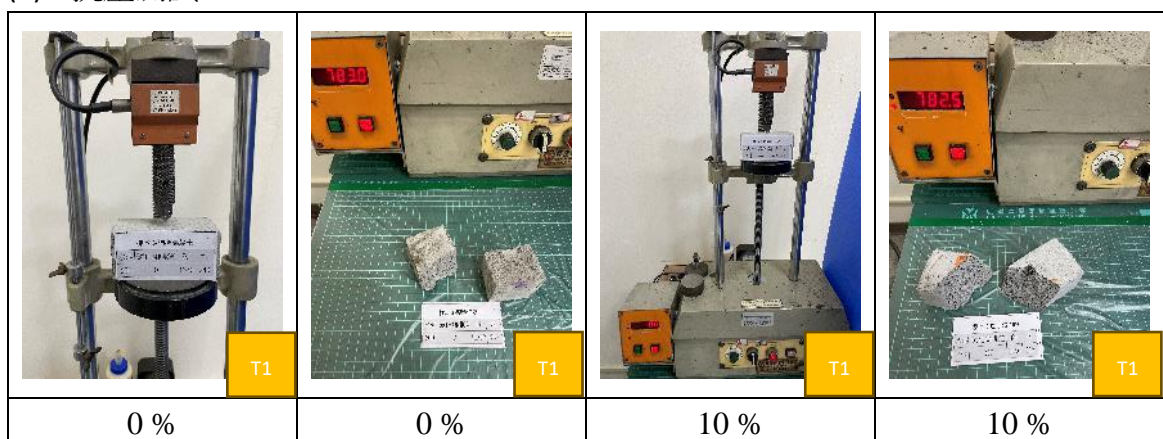
取代比例	水泥 (g)	砂石 (g)	碳化咖啡渣 (g)	水 (g)	總重(g)
0 %	750	2025	0	365	3140
10 %	750	1822	203	365	3140
20 %	750	1620	405	365	3140
30 %	750	1417	608	365	3140

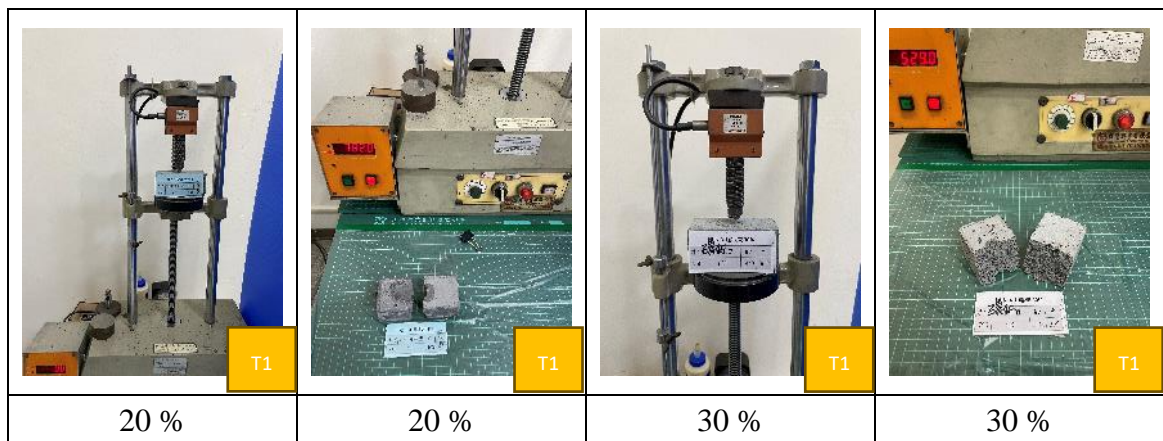


綜合以上製作的經驗來看，為什麼將砂石取代到 30 %就當作極限呢？因為在混合的過程中發現若是碳化咖啡渣的比例較高，混合起來也較不容易且也不容易成形，因此將 30 %取代當作此次研究的極限。

3. 不同碳化咖啡渣取代比例之抗壓測試

(1) 抗壓測試





(2) 抗壓測試結果紀錄：單位：(kgf / cm²)

取代比例	測試 1	測試 2	測試 3	平均抗壓
0 %	783.0	782.5	781.5	782.3
10 %	782.5	781.5	782.0	782.0
20 %	782.0	782.0	781.5	781.8
30 %	529.0	532.5	542.0	534.5

(3) 抗彎測試結果紀錄：單位：(kgf / cm²) (此組圖為第一指導老師拍攝)



取代比例	測試 1	測試 2	測試 3	平均抗彎
0 %	782.5	781.5	782.0	782.0
10 %	616.5	617.0	616.0	616.5
20 %	531.0	531.5	529.5	530.7
30 %	447.5	447.0	445.0	446.5

(4) 綜合比較：單位：(kgf / cm²)

取代比例	平均抗壓	平均抗彎	水泥塊均重(g)
0 %	782.3	782.0	466.95
10 %	782.0	616.5	410.07
20 %	781.8	530.7	404.92
30 %	534.5	446.5	365.53

☞ 在抗壓實驗中發現，取代 0 % 的抗壓能力最強接著是 10 %、20 %但是在 30 % 的取代中，數字突然下降，因此 30 % 取代會造成抗壓能力大幅下降。

☞ 在抗彎實驗中發現，取代的比例越高抗彎值越低。

☞ 砂子密度約 1.43 g/cm³，碳化咖啡渣密度約 0.51 g/cm³，在使用相同的重量下，碳化咖啡渣的比例若是越高可以製作出越多的水泥磚。

☞ 在環保條件下，經由實驗綜合判斷，取代 20% 是最理想的。




五、降低水泥使用量之探討

(一)、【如何更環保】

1. 在上面的實驗綜合評比中得到結果是取代 20 % 最理想，不但減少了砂石的使用且也利用了碳化咖啡渣來製作水泥磚頭，從製作水泥磚的材料有水泥、砂石、碳化咖啡渣、水中來討論，在上一個研究中已經找到取代砂石的最高比例，接著試著降低碳排放最多的水泥，如果水泥的使用量可以大幅降低，那麼就可以製作出更環保的水泥磚！

(二)、【在砂石取代 20 % 中降低水泥】(此組圖為第一指導老師拍攝)

1. 水泥是水泥磚一項很重要的原料也是全球太排放數一數二高的產物，如果可以降低水泥的使用量就可以大大的降低碳排放，接著此次研究要嘗試降低水泥的使用量，在取代砂石 20 % 比例中將水泥的量降低 10 %、15 %、20 %、30 %、40 %。











					
					
0%	降低 10% 水泥	降低 15% 水泥	降低 20% 水泥	降低 30% 水泥	降低 40% 水泥
平均重量： 466.86 g	平均重量： 398.97 g	平均重量： 408.04 g	平均重量： 394.19 g	平均重量： 362.33 g	平均重量： 376.23 g

製作水泥磚的過程發現，因為砂子的不同而有顏色上的差異，且水泥使用量越少表面看起來的孔隙也越多，重量也越輕；換句話說同樣的重量可以製作出更多的水泥磚，也更加環保。但是在製作降低 40 % 的水泥使用量時不易成型，判定水泥降低最多不能超過 40 %。











(三)、【降低水泥之強度探討】

1. 下表為降低 10 %、15 %、20 %、30 %、40 %水泥使用量之抗壓與抗彎測試

(1) 抗壓測試結果如下表：(此組圖為第一指導老師拍攝)

				
降低 10 %	降低 15 %	降低 20 %	降低 30 %	降低 40 %
				
降低水泥量	測試 1 (kgf)	測試 2 (kgf)	測試 3 (kgf)	平均抗壓(kgf)
降低 10 %水泥	783.0	782.5	783.0	782.8
降低 15 %水泥	782.0	780.5	781.5	781.3
降低 20 %水泥	638.5	636.0	637.5	637.3
降低 30 %水泥	407.0	405.0	406.5	406.2
降低 40 %水泥	328.5	325.5	327.5	327.2

(2) 抗彎測試結果如下表：(此組圖為第一指導老師拍攝)

				
降低 10 %	降低 15 %	降低 20 %	降低 30 %	降低 40 %
				

降低水泥量	測試 1(kgf)	測試 2(kgf)	測試 3(kgf)	平均抗彎(kgf)
降低 10 % 水泥	447.5	446.5	447.0	447.0
降低 15 % 水泥	782.0	780.5	781.5	781.3
降低 20 % 水泥	511.5	509.5	511.0	510.7
降低 30 % 水泥	532.0	532.5	530.5	531.7
降低 40 % 水泥	127.5	125.0	129.5	127.3

(3) 綜合抗壓和抗彎測試如下表：

降低水泥量	平均抗壓 (kgf)	平均抗彎 (kgf)	平均重量(kgf)
降低 10 % 水泥	782.8	447.0	404.07
降低 15 % 水泥	781.3	781.3	440.04
降低 20 % 水泥	637.3	510.7	394.31
降低 30 % 水泥	406.2	531.7	362.42
降低 40 % 水泥	327.2	127.3<低於標準>	376.27

水泥的使用量越多，在抗壓和抗彎的表現上都是比較好的，當水泥使用量下降會導致抗壓和抗彎的強度大幅下降。尤其是水泥從 30 % 降到 40 % 時，抗彎強度會突然下降許多，且在製作 40 %，6 個水泥磚中有 3 個不成形，製作的良率僅有 50 %，相較其他比例來說是最低的。

六、不同比例水泥磚透水探討

(一)、【水泥磚透水性】

- 水泥磚的製作根據實驗後選擇的方法應該為：碳化咖啡渣取代比例 20 %、水泥量可以降低到 30 %，根據調查，水泥磚使用的環境有一般人行道、車道或者隔熱的耐熱磚頭，因此透水性也是在使用水泥磚很重要的特性，接下來此次研究會將測量這次科展所製作的磚頭透水性來綜合比較。

(二)、【透水性測試】

- 首先先將標準配比的水泥磚進行三次透水性測試，先將口徑 12 mm 的粗吸管利用熱熔膠和油土固定在水泥磚對角線交點處，測量吸管水量下降 10 mm 所需要的時間。



(1) 第一次測量結果：

標準配比 1	標準配比 2	標準配比 3
11 分 00 秒	6 分 18 秒	28 分 09 秒

根據實驗結果發現，時間差異太大了，仔細觀察發現原因是表面粗糙程度不一，因此後續的實驗做了調整，統一將透水設備都固定在模型接觸空氣的那面，避免因為每塊水泥磚表面粗糙程度不同而影響實驗結果。

(2) 調整後測量結果：

標準配比 1	標準配比 2	標準配比 3	平均
687 秒	777 秒	649 秒	704.3 秒

標準配比 1 與平均相差 2.46 %、標準配比 2 與平均相差 10.32 %、標準配比 3 與平均相差 7.86 %，可以證明使用同一個表面測出來的透水時間較為準確。

(三)、【取代碳化咖啡渣-透水性測試】

取代比例	測試 1(秒)	測試 2(秒)	測試 3(秒)	平均(秒)
10 %	435	402	492	443.00
20 %	318	330	407	351.67
30 %	298	239	307	281.33

(四)、【降低水泥量-透水性測試】

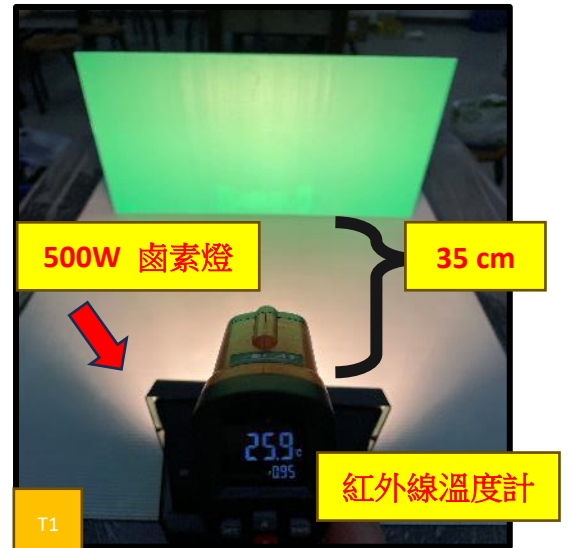
降低水泥	測試 1(秒)	測試 2(秒)	測試 3(秒)	平均(秒)
10 %	1524	1495	1583	1534.00
15 %	1312	1207	1399	1306.00
20 %	628	776	671	691.67
30 %	787	878	794	819.67
40 %	322	277	408	335.67

根據實驗結果判斷，取代的砂石越多、水泥使用量越少則透水較快，從這次實驗中也可以判定，砂石的量、水泥量都會影響水泥磚中間的孔隙。

七、不同比例水泥磚隔熱之探討

(一)、水泥磚也常見在砌磚牆使用或者是隔熱使用，因此也想知道這次取代比例且降低水泥使用量下，所製作的水泥磚隔熱的效果如何，設計實驗來測試水泥磚的隔熱效果。

1. 水泥磚放置在距離熱源 35 公分位置
2. 測量水泥磚尚未加熱時的受光表面溫度
3. 測量水泥磚尚未加熱時的背光表面溫度
4. 使用 500W 的鹵素燈加熱
5. 30 分鐘後測量水泥磚頭的受光、背光溫度

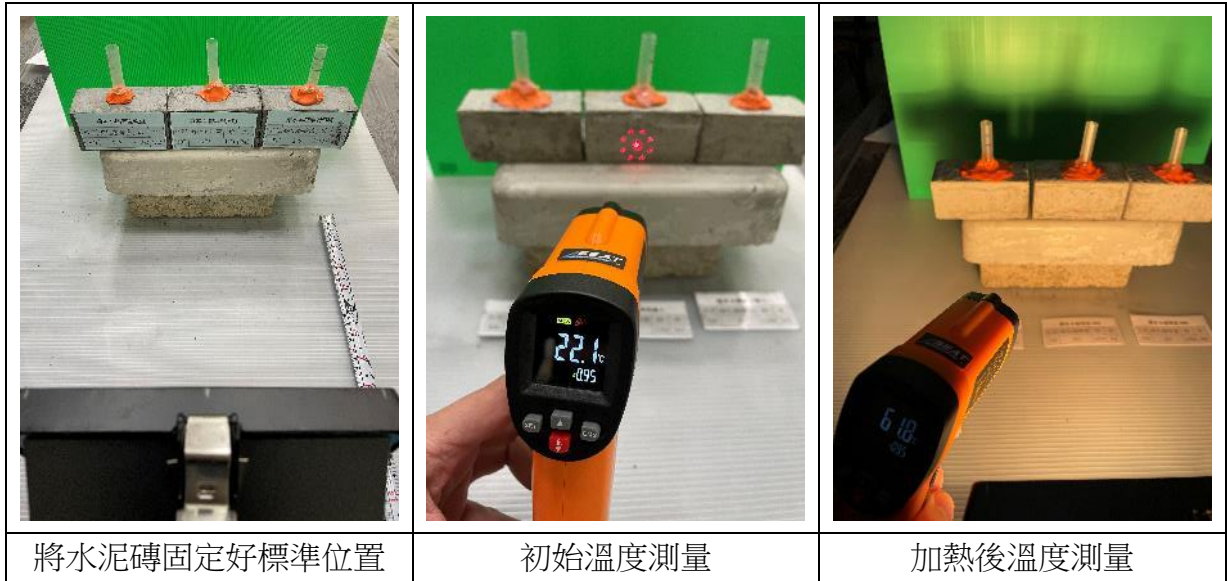


標準配比磚頭測試溫度變化

加熱時間	25 分鐘	30 分鐘	35 分鐘	40 分鐘
水泥磚表面溫度	40.7 °C	62.2 °C	62.1 °C	62.5 °C
鹵素燈溫度	137 °C	142 °C	142 °C	142 °C

經過 30 分鐘後溫度上升趨近於平緩，此次實驗加熱時間，設定為 30 分鐘後測量。

(二)、【水泥隔熱實驗】(此組圖為第一指導老師拍攝)




將水泥磚固定好標準位置

初始溫度測量

加熱後溫度測量


1. 標準配比水泥磚 (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	22.4	22.9	22.5	22.6
背光表面初溫	21.9	21.8	21.8	21.8
受熱表面末溫	58.9	62.3	57.6	59.6
背光表面末溫	29.3	33.0	31.0	31.1
受熱後表面溫差	29.6	29.3	26.6	28.5




2. 碳化咖啡渣 10% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	24.9	24.8	24.9	24.9
背光表面初溫	24.8	24.9	24.8	24.8
受熱表面末溫	57.6	61.7	55.7	58.3
背光表面末溫	35.0	40.6	39.4	38.3
受熱後表面溫差	22.6	21.1	16.3	20.0



3. 碳化咖啡渣 20% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	25.6	25.4	26.8	25.9
背光表面初溫	25.6	25.5	26.7	25.9
受熱表面末溫	52.1	62.0	54.1	56.1
背光表面末溫	30.3	34.5	32.4	32.4
受熱後表面溫差	21.8	27.5	21.7	23.7



4. 碳化咖啡渣 30% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	21.7	21.6	21.9	21.7
背光表面初溫	21.9	21.6	21.7	21.7
受熱表面末溫	52.3	61.2	53.1	55.5
背光表面末溫	31.4	37.0	35.1	34.5
受熱後表面溫差	20.9	24.2	18.0	21.0



5. 降低水泥 10% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	23.0	23.2	23.1	23.1
背光表面初溫	22.8	23.1	21.9	22.6
受熱表面末溫	51.2	66.7	62.6	60.2
背光表面末溫	36.8	45.3	42.0	41.4
受熱後表面溫差	14.4	21.4	20.6	18.8



6. 降低水泥 15% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	21.7	21.9	22.0	21.9
背光表面初溫	21.9	22.2	21.8	22.0
受熱表面末溫	53.6	60.9	51.6	55.4
背光表面末溫	37.3	40.1	36.8	38.1
受熱後表面溫差	16.3	20.8	14.8	17.3



7. 降低水泥 20% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	22.4	22.1	22.8	22.4
背光表面初溫	22.3	22.4	21.8	22.2
受熱表面末溫	52.6	61.8	52.5	55.6
背光表面末溫	34.7	40.2	38.3	37.7
受熱後表面溫差	17.9	21.6	14.2	17.9



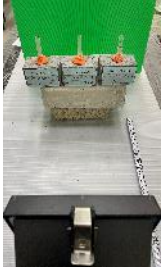
8. 降低水泥 30% (單位：℃)(下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	22.9	23.0	22.8	22.9
背光表面初溫	22.7	23.1	22.7	22.8
受熱表面末溫	57.5	61.6	54.5	57.9
背光表面末溫	34.3	36.4	32.8	34.5
受熱後表面溫差	23.2	25.2	21.7	23.4



9. 降低水泥 40% (單位：℃) (下圖為第一指導老師拍攝)

	測試 1	測試 2	測試 3	平均溫度
受熱表面初溫	23.1	23.2	24.3	23.5
背光表面初溫	23.6	23.7	23.3	23.5
受熱表面末溫	56.2	67.5	58.2	60.6
背光表面末溫	34.9	40.3	39.2	38.1
受熱後表面溫差	21.3	27.2	19.0	22.5



(三)、綜合比較

品項	受熱表面平均溫度 °C	受熱後表面溫差 °C
碳化咖啡渣 10 %	59.6	20.0
碳化咖啡渣 20 %	56.1	23.7
碳化咖啡渣 30 %	55.5	21.0
降低水泥量 10 %	60.2	18.8
降低水泥量 15 %	55.4	17.3
降低水泥量 20 %	55.6	17.9
降低水泥量 30 %	57.9	23.4
降低水泥量 40 %	60.6	22.5

比較結果發現，碳化咖啡渣中隔熱效果最好的是**取代 20%**，降低水泥量的部分是**降低 30%**的使用量隔熱最理想。

摩擦係數	安全等級
0.00-0.34	極度危險
0.35-0.39	非常危險
0.40-0.49	危險
0.50-0.59	很安全
0.60 以上	非常安全

八、水泥磚摩擦力測試

(一)、根據我國目前對於水泥地磚沒有明確的規範，但是根據美國 ASTM 將摩擦係數分為下列五種等級，分別如右表。

(二)、自製摩擦力測試儀第一代：

1. 將高扭力馬達固定在平台的一端，利用沒有彈性的塑膠繩將馬達與磅秤綁緊。磅秤則選擇可以記錄力量最大的時刻，那力量最大的時刻就會是最大靜摩擦力的數值。
2. 進行過程中發現，測試越多次平台的接觸面則會不同，造成實驗可能產生誤差，因此我們進行摩擦力測試時都會在**水泥磚下放置全新的 A4 白紙**，以確保每次接觸面都是相同的。



3. 拖行自製水泥磚和市售水泥地磚比較，各測得數據如下表，並利用摩擦力公式 $f_{s,max} = \mu N$ 推算出摩擦係數，自製環保水泥磚：1636g、市售水泥磚：2614g

地磚種類	第一次測試	第二次測試	第三次測試	平均	摩擦係數
自製水泥地磚	2kgw	1.9kgw	2.3kgw	2.06kgw	1.26
市售水泥地磚	2.6kgw	2.4kgw	2.3kgw	2.43kgw	0.96

實驗結果，我們自製的環保水泥磚和市售的水泥磚都屬於非常安全等級，實驗的最大誤差約有 10%，因此設計第二代摩擦力測試器。

(三)、自製摩擦力測試儀第二代：

1. 先將兩片木板利用兩片式後鈕固定，將水泥磚放置上面，利用木桿控制傾斜角度。
2. 利用傾斜角度推算下滑力，再利用摩擦力公式測得摩擦係數， $\text{摩擦係數} = \tan(\text{傾斜角度})$ 。
3. 傾斜角度實驗數據如下：

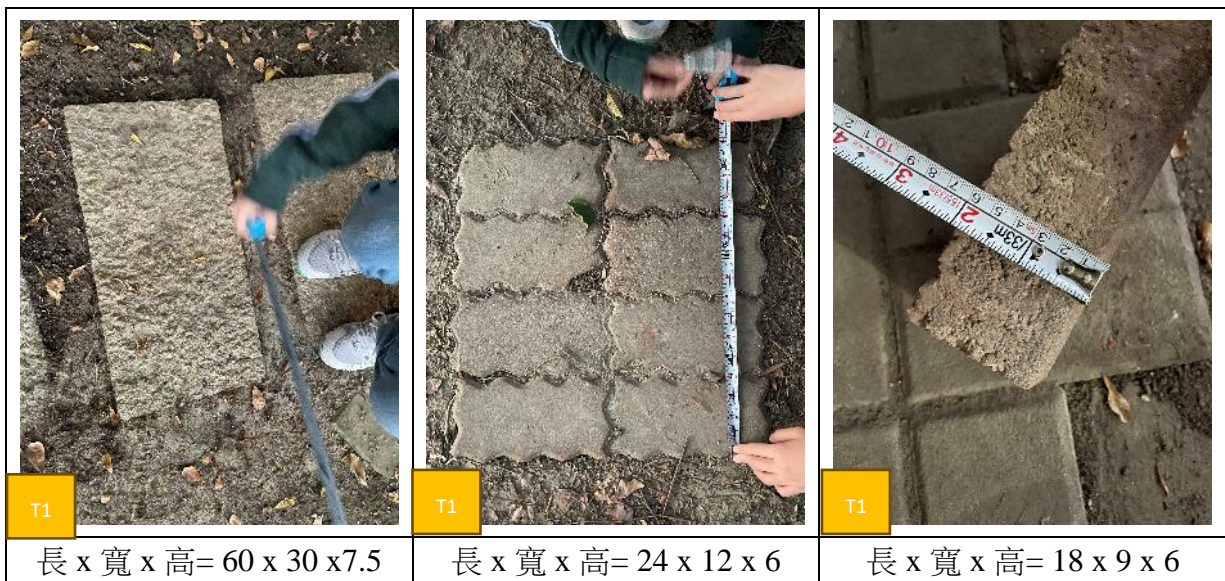


地磚種類	第一次測試	第二次測試	第三次測試	平均	摩擦係數
自製水泥地磚	40	42	39	40.33	0.84
市售水泥地磚	37	35	38	36.66	0.74

根據第二代自製摩擦力測試儀，測試後結果發現均符合非常安全等級。

九、製作最佳比例水泥磚及實際應用

- (一)、綜合以上的實驗歸納，**最佳比例的水泥磚為利用碳化咖啡渣取代 20% 的砂石，且可以降低水泥 15% 的使用量**，為最佳環保磚製作。有了最佳比例搜尋校園中使用地磚的位置，製作了此次研究的最佳水泥磚去實際應用。(下圖為第一指導老師拍攝)
(單位：公分)

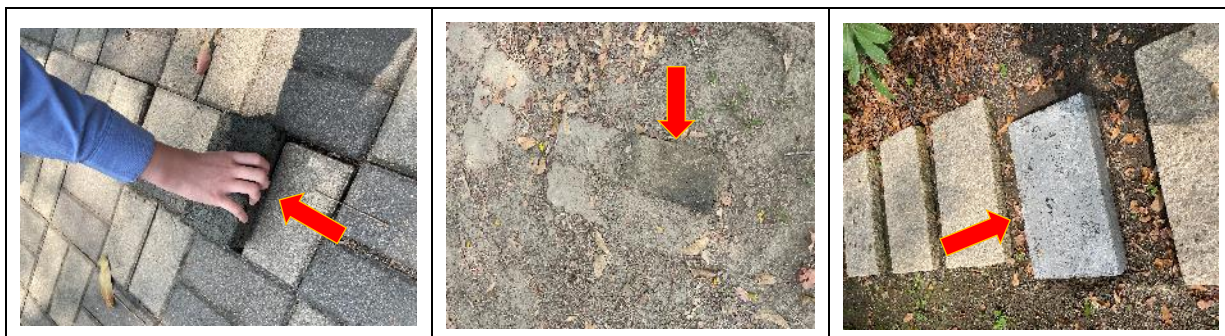





長 x 寬 x 高= 60 x 30 x 7.5

長 x 寬 x 高= 24 x 12 x 6

長 x 寬 x 高= 18 x 9 x 6

找了校園三個常見的地磚，製作我們設計的水泥磚經過養護期後換上使用，觀察使用後的結果，並實際了解使用後的效果如何。(下圖為第一指導老師拍攝) (單位：公分)



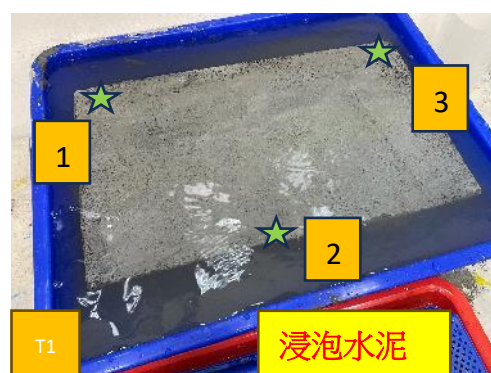
		
長 x 寬 x 高= 60 x 30 x 7.5	長 x 寬 x 高= 24 x 12 x 6	長 x 寬 x 高= 18 x 9 x 6
應用 1 號磚	應用 2 號磚	應用 3 號磚

換上後請學校體育老師在每節體育課時，帶學生經過踩踏後兩周後測量，學校約 800 位學生，每周體育課有 2 節， $2(\text{節課}) \times 800(\text{人數}) \times 2(\text{來回踩踏}) \times 2(\text{周}) = 6400$ 次，取出測量應用水泥磚的損傷情形。







(二)、【檢驗自製水泥磚效果】

1. 根據一系列實驗測試後歸納出，利用碳化咖啡渣取代 20% 的砂石，降低水泥 15% 的使用量為 **A 級最佳比例**，製作出應用水泥磚。

- (1) 將養護好的水泥磚放入水中浸泡 24 小時
- (2) 架子上放置 10 分鐘後，秤重並標記 3 個位置
- (3) 量測飽水後的水泥磚標記位置厚度
- (4) 使用兩周後取出測量



(下圖為第一指導老師拍攝)

	應用 1 號磚		應用 2 號磚		應用 3 號磚	
	使用前	使用後	使用前	使用後	使用前	使用後
飽水重量						
標記 1 號	6.5 cm	6.5 cm	6.7 cm	6.8 cm	7.9 cm	7.9 cm
標記 2 號	6.4 cm	6.4 cm	6.8 cm	6.7 cm	8.0 cm	7.9 cm
標記 3 號	6.4 cm	6.5 cm	6.7 cm	6.7 cm	7.9 cm	8.0 cm

發現重量都變重了，厚度差異皆小於 1%，差異不大。

伍、研究結果與討論

研究一：水泥相關資料、種類、碳排放量、測試方法

(一)、水泥地種類很多應用的範圍相當廣泛，此次研究所選擇的是成本最低且全球使用量最大的卜特蘭 1 型水泥，常見用途在一般建築、橋梁等。

(二)、強度的測量方法有分兩種，第一種為**抗壓強度**測試、第二種為**抗彎強度**測試，水泥泥磚強度測試分為三個等級，分級如下：

A 級	B 級	C 級
抗壓強度平均值 \geq 650 kgf/cm ²	抗壓強度平均值 \geq 500 kgf/cm ²	C 級抗壓強度平均值 \geq 450 kgf/cm ²
適用於 重型車道	適用於 中小型車道	適用於 人行道、自行車道

(三)、水泥磚的基本碳排放量

水泥磚原料	水泥	砂石	自來水
每公噸碳排	800~900 kg	232.39 kg	0.156 kg

按照標準砂漿配比，**混合出 4.235 噸的水泥砂漿會產生 1539.15 kg 的碳排放**。根據資料得到水泥磚最大的碳排放在於水泥原料的取得，若是在**製作水泥砂漿時可以降低砂石、水泥的用量，就可以大大的降低碳排放！**

研究二：原料選擇和碳化咖啡渣之處理

(一)、水泥部分從建材行取得台灣水泥，每 40 kg 200 元、砂石每 20 kg 53 元、天然瓦斯每 kg 約 12.9 元、咖啡渣來自於便利商店以及咖啡店收集咖啡渣，每 1 kg 0 元。

(二)、利用乾餾法來處理咖啡渣，先將咖啡渣利用太陽曬到重量不再變化，接著放入水泥爐內利用 700°C 以上高溫乾餾 45 分鐘，**1524 g 咖啡渣可以收集到約 460 g 的碳化咖啡渣**，使用約 233 g 瓦斯。

(三)、每公斤原料成本如下表：

台灣水泥	砂石	自來水	咖啡渣	碳化咖啡渣
5 元	2.65 元	0.0165 元	0 元	6.5274 元

標準配比混和出 4.235 公斤的水泥砂漿成本約 $5 \times 1 + 2.65 \times 2.75 + 0.485 \times 0.0165 = 12.295$ 元

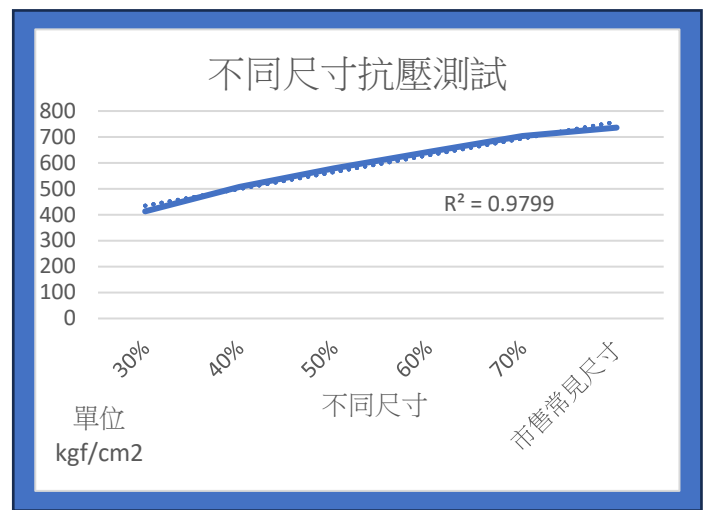
(四)、每公斤的碳化咖啡渣水泥砂漿成本如下表：

水泥砂漿種類	成本	水泥砂漿種類	成本
標準水泥砂漿配比	2.903 元	降低水泥 10%	3.368 元
取代砂石 10%	3.155 元	降低水泥 15%	3.348 元
取代砂石 20%	3.406 元	降低水泥 20%	3.327 元
取代砂石 30%	3.658 元	降低水泥 30%	3.285 元
		降低水泥 40%	3.24 元

在環保磚製作中，**碳化咖啡渣是影響整體成本最重要的因素**，碳化過程中會使用到瓦斯，時間也可能因為空氣中的溼度有所差異，濕氣越重，乾餾的時間就必須越久，越耗能源，未來若是可以結合太陽能或者是焚化爐熱源來處理碳化咖啡渣，成本就會下降許多。

研究三：製作標準混凝土水泥磚及探討不同尺寸混凝土水泥磚強度之不同

- (一)、 利用標準配比的水泥砂漿製作出 CNS 測量所需要的標準測量試體，試體的尺寸為 5 cm 的正立方體，經過標準養護後測量，**抗壓強度高達 779.2 kg/cm²**，達到 **A 級混凝土磚**的等級，為**混凝土磚最高等級**。
- (二)、 根據壓力測試結果發現，**水泥磚的強度會和本身的大小有關聯**，當**水泥磚的體積越大，則抗壓強度也越高**。
- (三)、 若要自行設計抗壓機器則可以選擇較小的尺寸來進行測量，所需要的垂直力道不用太大就可以製作出測試機器。



研究四：取代砂石使用量之探討

- (一)、 首先測試發現利用碳化咖啡渣取代部分砂石時，製作出的**水泥磚強度竟然贏過標準水泥磚**，反而強度更強，此次科展研究要製作出更環保的水泥磚，設想從砂石先下手，若可以**減少砂石的使用量**就可以降低更多的碳排。
- (二)、 根據實驗結果，取代 20 %是實驗中最佳的**比例**，**砂石取代量超過 30 % 在水泥磚的等級分類為 B 級**，因此此研究若要以 A 級水泥地磚來看，**取代砂石 20 % 是最佳的取代比例**。
- (三)、 根據實驗結果觀察，水泥砂漿凝固變成水泥磚時，**水分會減少，每次減少約 11 % 的重量**，下表是取代砂石使用量的水泥磚成本 (市售尺寸 50%)

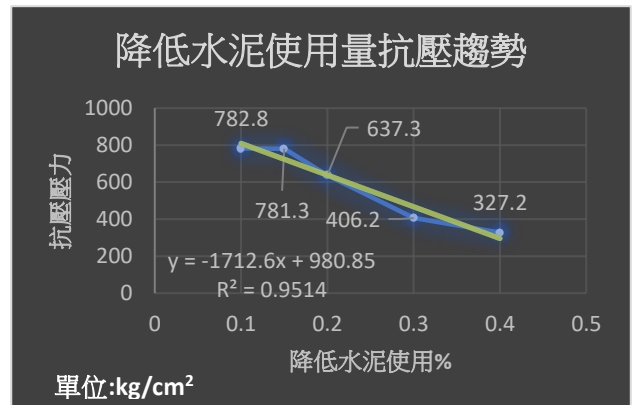
取代比例	平均抗壓	平均抗彎
0%	782.3	782.0
10%	782.0	616.5
20%	781.8	530.7
30%	534.5	446.5

取代 0 %	取代 10 %	取代 20 %	取代 30 %
1.355 元	1.293 元	1.379 元	1.337 元

成本計算方式為 $\frac{\text{水泥砂漿重量} \times \text{水泥砂漿成本}}{\text{水泥總重量} / \text{水泥塊平均重量}}$ ，經過計算發現，取代 10 % 的每塊成本最低，取代 20 % 成本最高，但僅高於標準配比水泥塊約 1.7 %，**經過抗壓、抗彎測試、成本考量、最佳等級，綜合評比認為 A 級水泥地磚，取代 20% 是最佳比例。**

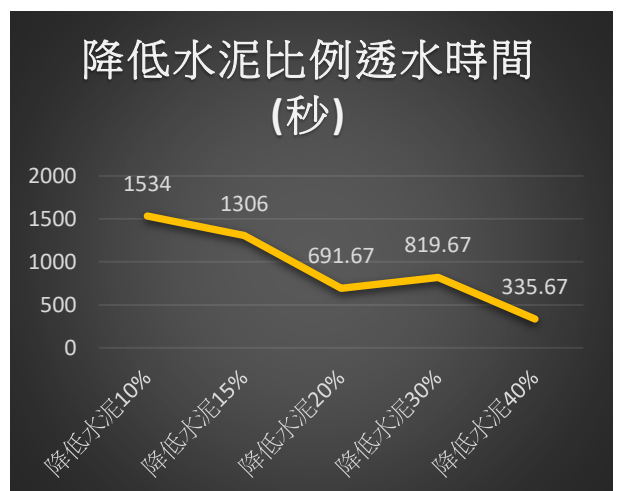
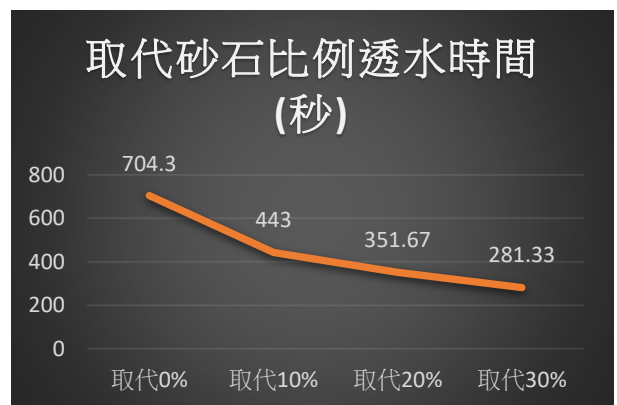
研究五：降低水泥使用量之探討

- (一)、根據碳排放資料顯示，水泥也是碳排放大戶，上面實驗已經找出取代最佳比例，接著降低水泥的使用量，就可以減少更多的碳排放。此次實驗先測試降低水泥使用量 10%、20%、30%、40%，根據製作結果發現，水泥量降低到 40%時，同時製作 6 塊水泥磚成功變成水泥磚的僅有 3 塊，良率 50%不符合製作成本，因此在製作時，不考慮將水泥比例降低 40%。
- (二)、根據抗壓測試發現，水泥使用的比例越低，強度也會隨著越低，在降低水泥使用量 10%經過測試是 A 級地磚，降低 20%為 B 級地磚，因此增加測試降低 15%水泥使用量，經過測試發現降低水泥使用量 10~15% 都仍符合 A 級地磚標準。根據趨勢表推測，將水泥量降低至 19.3%都是 A 級、19.3%~28%可以製作出 B 級水泥地磚。



研究六：不同比例水泥磚透水探討

- (一)、根據觀察水泥磚使用的環境發現，會遇到需要排水的情形，於是設計了透水實驗，剛開始發現數字差異竟然很大，仔細觀察發現，透水面的粗糙程度會影響透水結果，表面越粗糙、透水越快。調整實驗後得到數據平均下降 10 mm 的水，需要約 7 分 43 秒。
- (二)、取代砂石的透水實驗中得到數據歸納發現，取代的比例越高，透水的速度越快，所花的時間越少，根據實驗結果推測，砂石和碳化咖啡渣密度的不同，造成水泥磚內的縫隙不同而導致透水速度不相同。若要製作出透水速度快的水泥磚，則需要提高碳化咖啡渣的比例。
- (三)、降低水泥比例透水實驗中得到數據歸納發現，降低水泥使用量也會讓透水的時間變快，根據實驗結果推測，水泥細小，若是水泥的量越多，越能將中間的孔隙填滿，讓透水的速度較慢。



研究七：不同比例水泥磚隔熱之探討

(一)、水泥磚使用的環境可能會在熱源旁邊、或者是太陽長時間曝曬，都有升溫的可能，因此想藉由實驗了解水泥磚的隔熱效果是如何，利用鹵素燈當作加溫能源，利用紅外線溫度計測量水泥磚受熱後的溫度。距離的選擇是由於太陽長時間曝曬地面，地面的石頭溫度中午測量溫度最高大約 60°C

品項	受熱表面平均溫度 °C	受熱後表面溫差°C
碳化咖啡渣 10 %	59.6	20.0
碳化咖啡渣 20 %	56.1	23.7
碳化咖啡渣 30 %	55.5	21.0
降低水泥量 10 %	60.2	18.8
降低水泥量 15 %	55.4	17.3
降低水泥量 20 %	55.6	17.9
降低水泥量 30 %	57.9	23.4
降低水泥量 40 %	60.6	22.5

左右，經過實驗測得距離熱源 35 cm

處加熱水泥磚，最高溫大約也在 65°C 左右，因此設定距離為 35 cm，加熱 30 分鐘後溫度就沒有明顯變化，因此設定加熱時間為 30 分鐘。

(二)、根據實驗結果發現砂石被咖啡渣取代的越多，在同樣加熱的時間下，表面溫度越低。降低水泥量則是降低水泥使用量 15% 表面溫度最好，綜合評比取代 20% 的隔熱效果最好，降低水泥使用中降低 30% 隔熱效果最好，表面溫度則是降低水泥使用中降低 15 最低，我們黃金配比的水泥地磚不僅強度夠強，表面升溫也慢！長期曝曬下，地磚表面溫度也較低也更安全，可說是全方位地磚，若是僅需要隔熱的水泥磚，建議取代砂石的分量越高越好且不要降低水泥使用量！

研究八：水泥磚摩擦力測試

- (一)、根據我們自製摩擦力的測試結果，雖然我國現行法規沒有明確規定水泥地磚的摩擦力數值，但是我們自製的啡典型環保水泥磚也符合美國 ASTM 協會認證的摩擦係數超過 0.60 以上非常安全等級。
- (二)、與市售的水泥地磚進行比較，發現我們自製的環保水泥磚的摩擦係數大於市售的水泥磚，雖然我們的摩擦係數較高，經過在學校的測試後，根據學校健康中心的統計，沒有因為置換了我們自己的環保水泥磚增加跌倒受傷的次數，因此我們自製的環保水泥磚也具有良好的摩擦力！

研究九：製作最佳比例水泥磚及實際應用

(一)、找了學校使用地磚的位置，製作出符合 A 級最佳比例的水泥地磚替換上，測試兩周後取出測量。在測量水泥地磚的損耗程度則是利用水泥磚的重量，考慮到水泥磚會放置在戶外，可能會有落塵或者是踩踏後的泥土，所以

	應用 1 號		應用 2 號		應用 3 號	
	使用前	使用後	使用前	使用後	使用前	使用後
飽水重量 (kg)	1.795	1.815	3.067	3.195	21	22
平均厚度 (cm)	6.43	6.46	6.73	6.73	7.93	8.03

採用清洗表面的方式後測量，但又怕水泥內部可能含水，因此使用了浸泡水的方法，經由先前實驗測試，水泥浸泡水後 24 小時，重量變化在 1% 內，故利用清洗浸泡後的重量來觀察損耗程度。根據實驗結果發現，重量反而增加了，應用 1 號磚：增加約 1%、應用 2 號磚：增加約 4%、應用 3 號磚：增加約 4%，若以重量來看，水泥地磚損耗的程度非常的小，甚至是變的更厚實。

- (二)、利用水泥磚的厚度才判斷損耗程度，如果使用後水泥磚的厚度越薄，則損耗程度越高。根據實驗結果，在測試兩周的情況之後，厚度相差分別為 0.51%、0%、0%，可以從厚度得知，此次實驗所製作的水泥地磚，相當好用！

陸、結論

水泥和碳化咖啡渣混合起來竟然可以製作出一樣堅固的水泥磚，水泥製造、砂石採集、咖啡的製作過程和處理，都是當前排碳量很高的項目，沒想到碳化咖啡渣不但可以取代部分的砂石，並且可以讓降低水泥砂漿中水泥的使用量，達到節能減碳的目的。

根據抗壓實驗測試，水泥地磚的強度會因體積不同有比例的變化，體積越大、強度越高。在標準砂漿配比中，利用碳化咖啡渣取代部分砂石是可行的，實驗中最多可以取代到 30% 仍然可以維持在一定的強度，強度會因為取代的比例有所改變，取代越多、強度則越低但碳化咖啡渣孔隙較多，取代越多則透水也會越快。

經由實驗發現，水泥在砂漿中的角色像是把所有物質聚在一起，類似黏著劑的概念，當降低水泥比例則會影響到水泥地磚成形與否，降低太多導致水泥磚不易成形且抗壓強度會降低，最多可以降低 30% 的水泥使用量。

按照實驗測試，製作出 A 級水泥地磚可以取代 20% 的砂石、降低 19.3% 的水泥，在我們測試階段，相較標準配比水泥砂漿成本僅僅增加約 10%，但可以減少約 25% 的碳排放且降低 9~15% 的重量，且摩擦係數大於 0.6 屬於非常安全等級且可以快速排水，推薦使用黃金比例配方，不但可以維持抗壓強度和輕量化也可以達到節能減碳的目的。

柒、未來展望

1. 若是可以尋找到替代能源，結合工廠廢棄熱源或者是焚化爐的熱源，這樣子成本可以大大節省。
2. 利用過碳化的咖啡渣可以取代部分比例的砂石，未來可利用其他植物的廢棄物回收製作，達到環保再利用且節能減碳。
3. 可以再縮小水泥磚比例，自製壓力測試器來檢驗抗壓強度。
4. 可實驗我們的比例是否能利用在空心磚上也有相同的效果，使磚頭更多用途且達到節能減碳的目的。

捌、參考資料及其他

1. <https://technews.tw/2022/08/08/brimstone-energy-says-calcium-silicate-cement-could-cut-carbon-emissions/#more-941731>
2. 經濟部標準檢驗花蓮分局：<https://hualien.bsmi.gov.tw/wSite/public/Data/f1477894215150.pdf>
3. 卜特蘭水泥成分
<https://www.che.ncku.edu.tw/historicalgallery2/index.php?option=module&lang=cht&task=pageinfo&id=514&index=2>
4. 水泥流程圖(東南水泥) <http://www.southeastcement.com.tw/index.php?q=node/27>
5. 產業節能減碳資訊網
https://ghg.tgpf.org.tw/Counseling/Counseling_more?id=ecd60edc57744046bc4274df4df38aba
6. 交通部公路局工程材料技術所-水泥砂漿抗壓測試
<https://mtl.thb.gov.tw/cp.aspx?n=12496>
7. ASTM D790 三點抗彎測試
<https://www.astm.org/d0790-17.html>

【評語】 083010

1. 本實驗對減碳及地球永續循環經濟具正向貢獻。
2. 本研究利用碳化咖啡渣取代水泥砂漿中的砂石，降低水泥使用量，探討最佳配比，製作出環保且具相當強度的水泥磚。
3. 咖啡渣碳化的處理方式過程非常仔細。
4. 水泥砂漿試體重量之差異宜加強。
5. 不同尺寸試體之試驗建議採用圓柱試體。
6. 降低水泥量之抗彎強度應較低。
7. 透水性測試建議詳細說明。
8. 結果與討論詳細。

作品簡報



「咖」讚！

「啡」典型環保水泥磚



- 水泥砂漿取代配比強度之探討

壹、摘要

水泥是生活中不可或缺的原料，卻是**碳排大戶**，約佔全球**7%**。另一大環境負擔是全球每年產出超過**1600萬噸**的咖啡渣。本次研究將利用**碳化咖啡渣取代水泥砂漿中的砂石**，並**降低水泥使用量**，找出**黃金配比**，**製作出環保且具有相當強度的水泥磚**，目的是能**降低製造水泥磚時所產生的碳排**。從**強度討論**，設計【**不同尺寸水泥磚的強度**】、從**原料中探討**【**碳化咖啡渣取代砂石比例**】、【**降低水泥使用量**】，從**實際運用上測試**【**水泥磚透水**】、【**水泥磚隔熱**】、【**摩擦力測試**】。從實驗歸納，利用**碳化咖啡渣取代20%的砂石**能夠維持一定強度，且**降低水泥19.8%的使用量**仍可維持在**A級水泥地磚標準**，黃金配比的水泥磚，不但製作出**高強度且輕量化**的水泥磚更可以**降低25%的碳排放**。

貳、研究動機

水泥是地球用量第二大材料，僅次於水，每年全球生產超過**40億噸**水泥，佔**全球總碳排量7%**，相當於航空業的四倍；如果水泥是一個國家會榮登地球**第三排碳國**，咖啡目前世界平均每日要消耗掉**22.5億杯**咖啡，台灣人一年喝掉**28.5億杯**咖啡，每杯平均**20公克**，一年產生超過**1600萬噸**的咖啡渣，咖啡渣因為容易發霉不容易再利用，且用掩埋處理會產生大量溫室氣體且會升溫導致**碳排增加**，加劇全球暖化。目前咖啡渣的處理方法都是當作一般垃圾焚燒處理，看到澳洲墨爾本皇家理工大學竟然拿咖啡渣去和水泥混和製作出**混凝土**，讓我們想要了解其中的比例是如何，在哪種比例下可以製作出**環保減碳又堅固**的水泥磚。

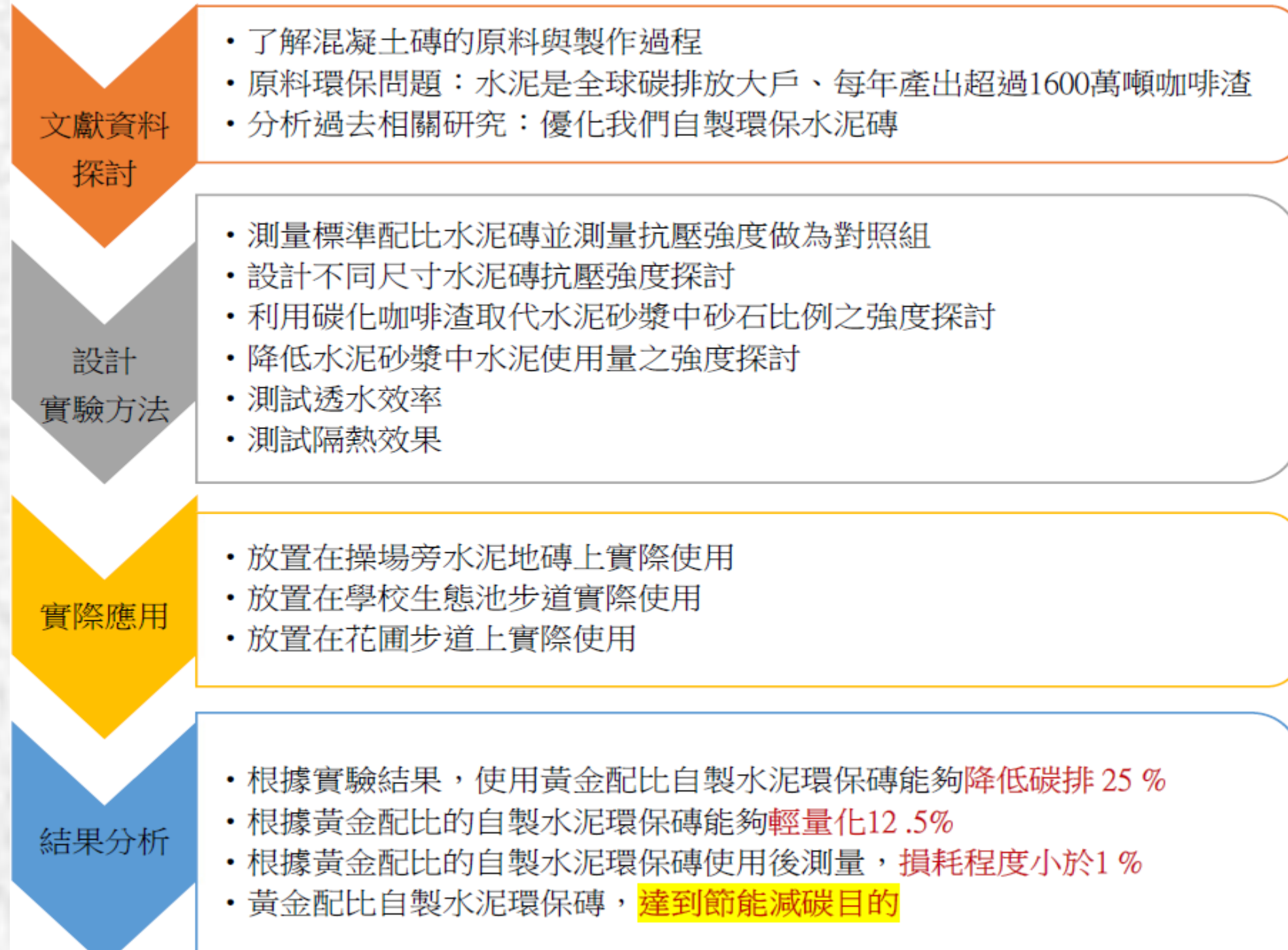
參、研究目的

- ★研究(一)：搜尋水泥磚相關資料
- ★研究(二)：原料選擇和**碳化咖啡渣**之處理
- ★研究(三)：製作**標準混凝土水泥磚**及探討**不同尺寸**混凝土水泥磚強度之不同
- ★研究(四)：**取代砂石**使用量之強度探討
- ★研究(五)：**降低水泥**使用量之強度探討
- ★研究(六)：**不同比例**水泥磚透水探討
- ★研究(七)：不同比例水泥磚隔熱之探討
- ★研究(八)：水泥磚摩擦力測試
- ★研究(九)：製作**最佳比例**水泥磚及實際應用

肆、設備與器材

製作工具	測量工具	製作原料
1.電動攪拌器	1.捲尺	1.卜特蘭水泥 1 號水泥
2.雷切木板水泥模	2.電子秤	2.自來水
3.雷切壓力克水泥模	3.壓力機	3.咖啡渣
4.塑膠水盆	4.碼表	4.砂石
5.高溫乾餾爐	5.紅外線溫度計	5.凡士林
	6. 500w 鹵素燈	

伍、實驗架構圖



陸、研究方法、過程

【研究一】

搜尋水泥磚相關資料，找出水泥種類、原料資訊、測試的方法有哪些？

(一)原料的選擇

水泥地種類有相當的多種，但是在綜合比較上，此次科展主題製作的是水泥磚，因此根據特性以及成本的關係，這次研究選用卜特蘭1型水泥當作這次研究的水泥材料。

卜特蘭1型水泥的成分為：

由矽酸鹽水泥熟料、0%-5%石灰石或粒化高爐渣、適量石膏磨細製成的水硬性膠凝材料。

波特蘭水泥熟料的主要成分為

矽酸三鈣 ($3CaO \cdot SiO_2$)、矽酸二鈣 ($2CaO \cdot SiO_2$)、鋁酸三鈣 ($3CaO \cdot Al_2O_3$) 和鐵鋁酸四鈣 ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)

(二)水泥碳排放

根據經濟部產業節能減碳資訊網站資料，水泥產業因為製程特性，以旋窯高溫煅燒生產水泥熟料過程石灰石分解，以及燃料與電力等能源耗用，是碳排放量相對高的產業，約佔**全球碳排7%**，水泥的生產流程包含開採石灰石、研磨生料、燒製熟料與研磨水泥，平均**每生產一噸水泥會排放0.8到0.9噸的二氧化碳**，其中，約60%來自於石灰石原料煅燒的製程排放、35%是煤炭燃燒的排碳，以及5%的用電排碳。

(三)砂石碳排放與咖啡豆碳排

根據產品碳足跡資訊網中資料，咖啡雖然是植物性食物，**每公斤產生的碳排放約17kg**，碳排放在植物中算是高碳排的植物。

(四)水泥養護

根據公共工程委員會施工綱要規範第03390章混凝土養護以及CNS國家標準局的養護法來養護此次實驗用的水泥磚。

(五)混凝土強度測試

1.抗壓測試

- (1)圓柱抗壓式體模測試
- (2)立方體抗壓式體模測試

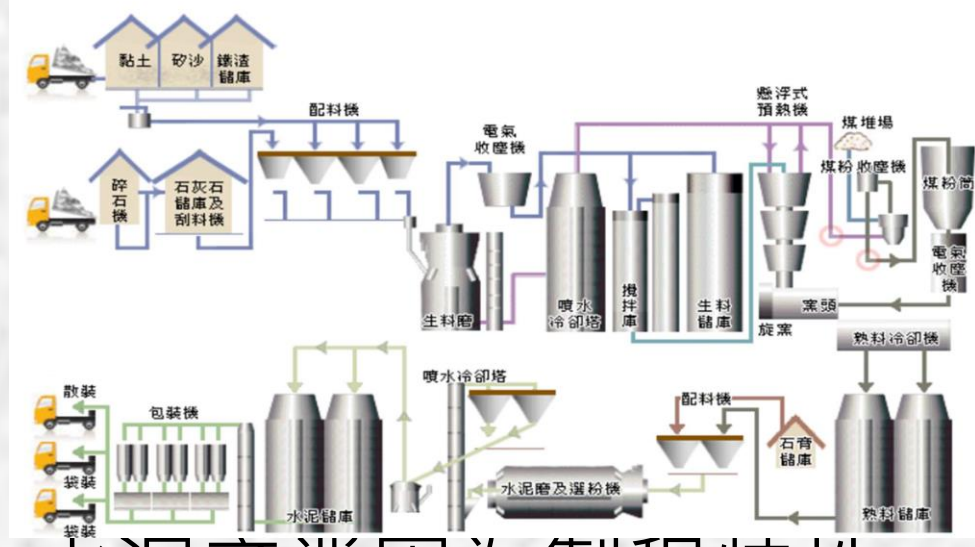
2.抗彎測試

- (1)根據ASTM抗彎測試法，試體兩邊架高，間壓力測試，取得抗彎壓力值。

3.衝錘試驗法

混凝土檢測 - 反彈錘 外殼 彈簧 衝擊桿 錘塊 混凝土的表面硬度測量，並用此測量來推測其混凝土抗壓強度。是一種以表層混凝土(1~3mm)的質量推斷整體質量的表面硬度法。

水泥種類	使用範圍	特性	常用用途
★卜特蘭1型	不特別暴露於含硫酸鹽土壤或地下水結構工程使用。	不具其他種水泥特性，一般建築工程使用，占水泥使用量的九成以上。	鐵路、電力、橋樑、一般建築等。
卜特蘭2型	抵抗中等硫酸鹽侵蝕的地方，避免龜裂。	較第一型水泥含有較低的水合熱，具較低含量及中度抗硫酸鹽特性。	大橋墩、重力式擋土牆。
卜特蘭3型	短期內需要拆模者適用。	特別需要高強度早期強度者，一周內或更短。	道路鋪設、軍事工程、水中工程。
卜特蘭4型	水合熱發展速率慢，保持最低限度內，其強度的發展速率較第一型水泥慢。	硬化時水合熱為第一型的70%。	水壩工程、巨大體積工程。
卜特蘭5型	混凝土暴露於嚴重硫酸鹽侵蝕作用的地區。	具有抵抗硫酸鹽侵蝕、凍融之特性。	抗酸鹼、地下室、溫泉區等特殊環境之工程。
卜特蘭高強水泥	可取代傳統一般混凝土所用1型水泥。	具較低水合熱、較高早期強度、耐久性及低成本等使用方便、節省成本、無須再加其他添加物、節省工時、施工容易、可施作薄層、不易乾縮龜裂、保水性佳、浮水量少。	大壩工程、海墘工程、隧道工程及下水工程。
增稠水泥	適用於增稠。		土木師傅用於泥作施工之水泥。
水硬性水泥 IP 型		低水合熱、高度抗硫酸鹽侵蝕性。	海軍工程及產業巨額混凝土建築物。



類別	成功大學研究數據 (kgCO ₂ /kg)	SimaPro數據 (kgCO ₂ /kg)	
石質	砂礫	0.03	0.00239
	採石	0.04	0.23
	合計	0.07	0.23239



【研究二】

原料選擇和碳化咖啡渣之處理

(一)根據澳洲莫爾本皇家理工學院的研究指出，咖啡渣可以取代混凝土中的砂石，一樣可以達到混凝土提供的強度，首先我們從處理咖啡渣開始。

(二)咖啡渣的處理與收集

- 咖啡渣屬於生物類廢料，目前被當作垃圾處理，目前主要的處理方式是掩埋，但是大量掩埋咖啡渣時，會產生大量甲烷，影響空氣的品質，若可以加以利用咖啡渣來製作其他物品，可以達到更環保且有效的利用。此次主題利用咖啡渣來當作取代砂石的原料，不但可以減少砂石使用還可以再次廢物利用，達到環保再利用的功能。將咖啡渣發揮最大價值！
- 咖啡渣來自於附近便利商店、咖啡店。

(三)碳化咖啡渣處理

- 步驟1:製作乾餾器具，利用不銹鋼盒和卡式爐製作乾餾器具。先將咖啡渣利用太陽曬乾，再放入鐵密閉，利用卡式爐直火加熱，當白色煙霧停止時，乾餾完成。
- 乾餾數據如下：

乾餾溫度	乾餾前重量	乾餾後重量	乾餾時間	瓦斯
約 460 [C	672 g	232 g	47 分鐘	233 g

乾餾後重量剩原本重量約35%左右，體積為原本的30%，鐵盒溫度最高溫可以高達400°C左右，但是每次需要用的碳化咖啡渣用量太大，這樣子的處理速度太慢因此我們改良了第二代的乾餾器具，將不鏽鋼鍋加大，如此一來才能一起處理較多的咖啡渣，不但增加處理效率也同時節約碳化的能源。

- 步驟2:加大乾餾器具，發現溫度不夠高，乾餾失敗。
- 步驟3:利用水泥自製乾餾爐，使用744°C，高溫乾餾，乾餾時間約45分鐘，可以一次處理1524g的咖啡渣。



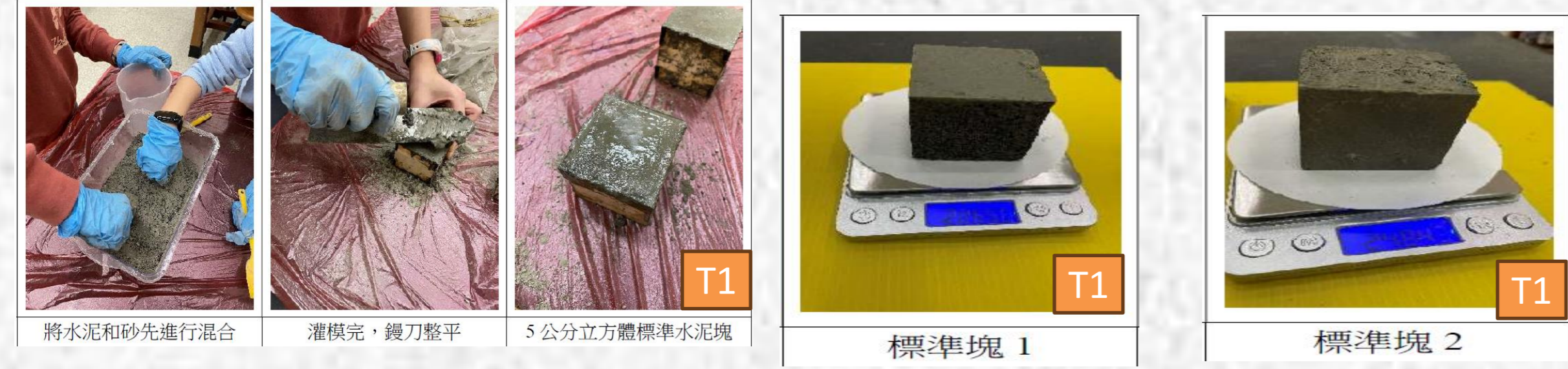
【研究三】

製作標準混凝土水泥磚及探討不同尺寸混凝土水泥磚強度之不同

(一)【標準試體製作】

1. 根據CNS 國家標準測量的試體為邊長5 cm 的立方體測試，接著按照以下步驟進行製作

- (1) 水泥砂漿標準配比為 水：砂：水泥 = 0.485：2.75：1
- (2) 混合後快速將水泥砂漿灌入模型
- (3) 靜待24 小時將模拆開，讓水泥塊進行熟成養護
- (4) 完成養護7、28 天
- (5) 進行抗壓測試標準水泥塊



(二)【標準試體抗壓測試】

1. 將標準試體放入壓力測試機平台上測試

- (1) 將標準試體放入平台正中間
- (2) 旋轉速度採用80 (每分鐘轉80 圈)旋轉向上
- (3) 鑽頭面積為 $0.2 \times 1.6 = 0.32$ 平方公分
- (4) 標準塊1~6 為7 天養護期測試
- (5) 標準塊7~12 為28 天養護期測試

標準養護 7 天後抗壓測試							
標準塊	編號 1	編號 2	編號 3	編號 4	編號 5	編號 6	平均
壓力	665.0	659.2	661.8	664.0	664.0	663.5	662.9
標準養護 28 天後抗壓測試							
標準塊	編號 7	編號 8	編號 9	編號 10	編號 11	編號 12	平均
壓力	782.3	775.5	778.6	781.2	781.2	780.6	779.9

標準試體7 天養護抗壓測試後得平均壓力為 662.9 kgf/cm^2 ，標準試體28 天後養護抗壓測試後得平均壓力為 779.9 kgf/cm^2 ，兩者抗壓相差 117 kgf/cm^2 ，相差約15%，代表7 天養護後的抗壓已經達到一定程度，但28 天後強度更佳。

(三)【不同尺寸試體製作】

1. 根據標準試體測量結果發現，在測量壓力時，因為標準試體相當的穩固在破壞的過程中會碎裂導致水泥碎屑噴出，有一定的危險性，因此想要了解不同尺寸之下，抗壓的程度是否會有相當的關聯呢？

- (1) 市售水泥磚尺寸為長×寬×高 = $20 \times 10 \times 6$ 立方公分
- (2) 將長、寬、高成等比例縮小製作水泥磚

尺寸	長 cm	寬 cm	高 cm
市售尺寸	20	10	6
70%	14	7	4.2
60%	12	6	3.6
50%	10	5	3
40%	8	4	2.4
30%	6	3	1.8

2. 製作不同尺寸的水泥磚
3. 不同水泥磚的抗壓強度測試

尺寸	常見市售	70%	60%	50%	40%	30%
壓力 (kgf/cm ²)	736.0	703.5	642.2	578.5	507.3	413.2
重力(kgf)	2300.0	2198.4	2006.9	1807.8	1585.3	1291.3

根據重力測試後換算抗壓程度，發現尺寸的縮小和抗壓的程度有一定的關係，從此實驗可以得知尺寸越小抗壓程度越低，測試之後的回歸線R² 值都大於0.97，代表有一定的關聯，往後的測試將會採用市售常見尺寸50%的比例製作水泥磚測試。

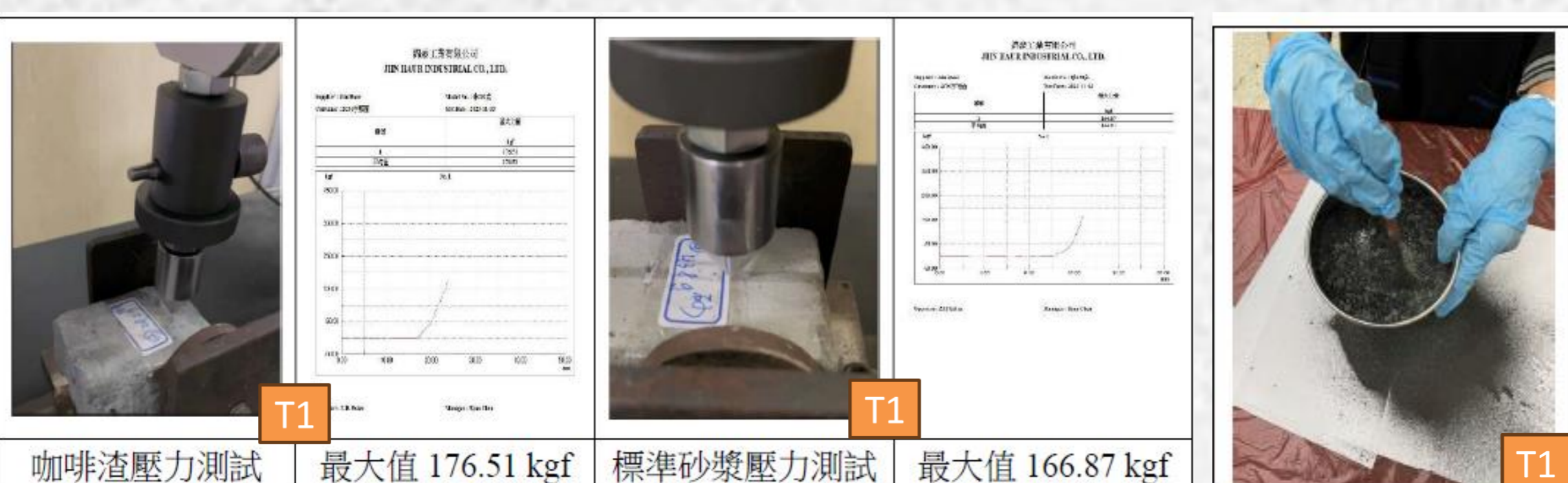
【研究四】

碳化咖啡渣取代砂石使用量之探討

(一)【取代是否比較強?】是!

1. 一般的水泥砂漿利用水泥、砂石、和水去混合，經過材料相互作用之後讓水泥和水結合變成堅硬的水泥，如果可以減少其中砂石的使用，可以減少很多的碳排放，因此這次科展想要了解，砂石和碳化咖啡渣中取代的比例究竟可以高達多少？

- (1) 首先利用標準配比的水泥砂漿，將其中的砂石重量利用碳化咖啡渣取代重量的20%進行水泥砂漿混合灌模
 - (2) 過程中發現砂石和碳化後的咖啡渣顆粒大小不同，為了確保實驗準確性，先將砂石和碳化後的咖啡渣進行過篩，確保實驗所使用的都是在一定篩選後的砂石以及碳化咖啡渣
 - (3) 脫模後，進行標準養護28 天接著進行抗壓測試
- 壓力測試後初步得到結果是利用**碳化咖啡渣的水泥塊最大抗壓力為 176.51 kgf 就會破裂**，標準砂漿最大抗壓力為 166.87 kgf ，兩者相差約5.4%左右，換句話說，取代其中的砂石20%的重量不但可以節省砂石抗壓力還增加。



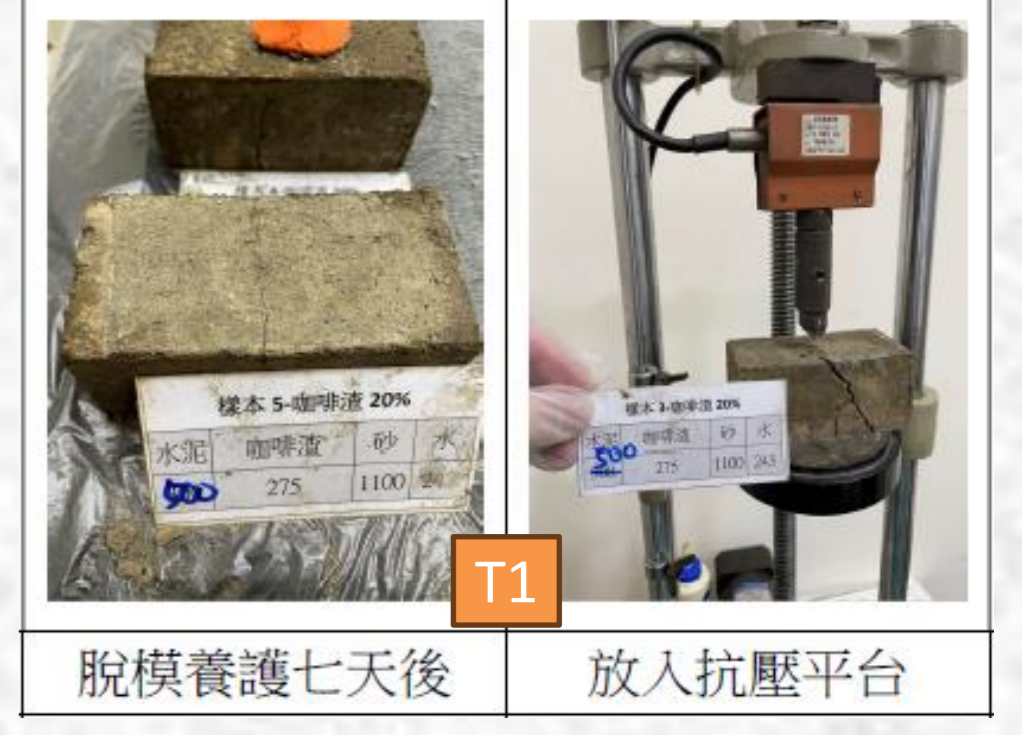
咖啡渣壓力測試 最大值 176.51 kgf 標準砂漿壓力測試 最大值 166.87 kgf

(二)【咖啡渣一定要碳化嗎?】必須碳化!

1. 上面實驗發現利用碳化咖啡渣可以取代部份的砂石，其實處理碳化咖啡渣的過程需要耗費大量的時間，設想如果咖啡渣直接拿來利用，是否會有一樣的效果呢？如果有一樣的效果那就可以大大降低的處理所耗費的時間與能源。

- (1) 將其中的砂石利用咖啡渣直接混合均勻
 - (2) 脫模後進行養護28 天後抗壓力測試
- 在混合後的過程觀察，咖啡渣直接使用會有幾個問題產生，

- (1) 咖啡的味道相當濃厚
- (2) 不容易脫模
- (3) 在移動的過程中水泥磚就產生裂縫，經過抗壓機的**壓力測試後竟然 11.5 kgf/cm^2 就產生破壞性的裂縫**，抗壓力只有取代20%的2%，因此使用碳化咖啡渣是必要的!!



脫模養護7天後 放入抗壓平台

(三)【不同取代比例】

1. 在這次研究初步將砂石利用碳化後的咖啡渣取代，首先先測試20%砂石和碳化咖啡渣的重量取代，實驗結果相當的好，發現利用碳化咖啡渣的抗壓能力完全不遜色於原本的標準配比製作的水泥砂漿做的水泥塊。接著這項研究會將水泥砂漿中的砂石取代比例從重量的10%、20%、30%進行混合測試結果。
2. 下表為每次製作六塊尺寸50%的水泥磚所需材料。

取代比例	水泥 (g)	砂石 (g)	碳化咖啡渣 (g)	水 (g)	總重(g)
0%	750	2025	0	365	3140
10%	750	1822	203	365	3140
20%	750	1620	405	365	3140
30%	750	1417	608	365	3140

綜合以上製作的經驗來看，為什麼將砂石取代到30%就當作極限呢？因為在混合的過程中發現若是碳化咖啡渣的比例較高，混合起來也較不容易且也不容易成形，因此將30%取代當作此次研究的極限。

3. 不同碳化咖啡渣取代比例之抗壓測試

(1) 抗壓結果

取代比例	測試 1	測試 2	測試 3	平均抗壓
0%	783.0	782.5	781.5	782.3
10%	782.5	781.5	782.0	782.0
20%	782.0	782.0	781.5	781.8
30%	529.0	532.5	542.0	534.5

(2) 抗彎結果

取代比例	測試 1	測試 2	測試 3	平均抗彎
0%	782.5	781.5	782.0	782.0
10%	616.5	617.0	616.0	616.5
20%	531.0	531.5	529.5	530.7
30%	447.5	447.0	445.0	446.5

(3) 綜合比較

在抗壓實驗中發現，取代0%抗壓能力最強接著是10%、20%但是在30%的取代中，數字突然下降，因此30%取代會造成抗壓能力大幅下降。在抗彎實驗中發現，取代的比例越高抗彎值越低。砂子密度約 1.43 g/cm^3 ，碳化咖啡渣密度約 0.51 g/cm^3 ，在使用相同的重量下，碳化咖啡渣的比例若是越高可以製作出越多的水泥磚。在環保條件下，經由實驗綜合判斷，**取代20%是最理想的。**

取代比例	平均抗壓	平均抗彎	水泥塊均重(g)
0%	782.3	782.0	466.95
10%	782.0	616.5	410.07
20%	781.8	530.7	404.92
30%	534.5	446.5	365.53

【研究五】

降低水泥使用量之探討

(一)【在砂石取代20%中降低水泥】

- 已經找到**取代砂石的最高比例**，接著試著降低碳排放最多的水泥，如果水泥的使用量可以大幅降低，那麼就可以製作出更環保的水泥磚！在取代砂石20%比例中將水泥的量降低10%、15%、20%、30%、40%。
- 製作水泥磚的過程發現，因為砂子的不同而有顏色上的差異，且水泥使用量越少表面看起來的孔隙也越多，重量也越輕；換句話說同樣的重量可以製作出更多的水泥磚，也更加環保。但是在製作降低40%的水泥使用量時不易成型，判定**水泥降低最多不能超過40%**。

(二)【降低水泥之強度探討】

1. 下表為降低水泥使用量之抗壓與抗彎測試

降低水泥量	測試 1 (kgf)	測試 2 (kgf)	測試 3 (kgf)	平均抗壓(kgf)
降低 10%水泥	783.0	782.5	783.0	782.8
降低 15%水泥	782.0	780.5	781.5	781.3
降低 20%水泥	638.5	636.0	637.5	637.3
降低 30%水泥	407.0	405.0	406.5	406.2
降低 40%水泥	328.5	325.5	327.5	327.2

降低水泥量	測試 1(kgf)	測試 2(kgf)	測試 3(kgf)	平均抗彎(kgf)
降低 10%水泥	447.5	446.5	447.0	447.0
降低 15%水泥	782.0	780.5	781.5	781.3
降低 20%水泥	511.5	509.5	511.0	510.7
降低 30%水泥	532.0	532.5	530.5	531.7
降低 40%水泥	127.5	125.0	129.5	127.3

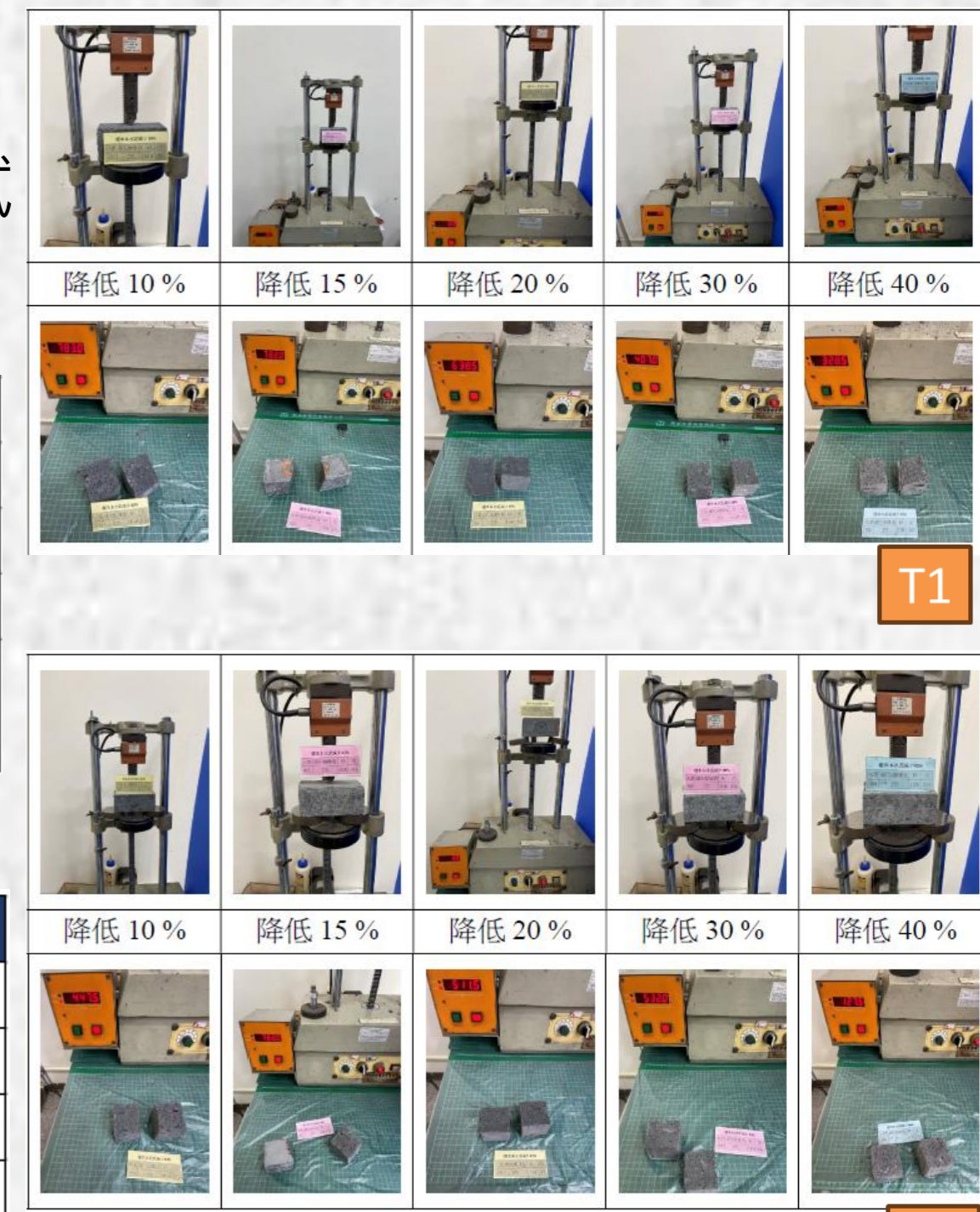
2. 綜合比較

水泥的使用量越多，在抗壓和抗彎的表現上都是比較好的，當水泥使用量下降會導致抗壓和抗彎的強度大幅下降。尤其是水泥從30%降到40%時，抗彎強度會突然下降許多，且在製作40%、6個水泥磚中有3個不成形，製作的良率僅有50%，相較其他比例來說是最低。

降低水泥量	平均抗壓 (kgf)	平均抗彎 (kgf)	平均重量(kgf)
降低 10%水泥	782.8	447.0	404.07
降低 15%水泥	781.3	781.3	440.04
降低 20%水泥	637.3	510.7	394.31
降低 30%水泥	406.2	531.7	362.42
降低 40%水泥	327.2	127.3<低於標準>	376.27



降低10% 降低15% 降低20% 降低30% 降低40%



降低10% 降低15% 降低20% 降低30% 降低40%

